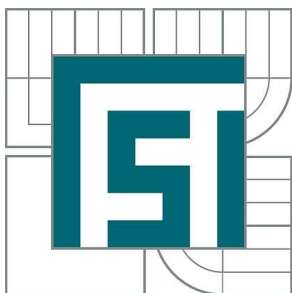


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

NÁVRH A OPTIMALIZACE OJNICE MOTORU ZÁVODNÍHO AUTOMOBILU

CON ROD DESIGN AND OPTIMIZATION OF RACING ENGINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAROSLAV ULMAN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN BERAN

BRNO 2010

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a optimalizací ojnice motoru závodního automobilu. Na začátku celé práce je vytvořen 3D-model ojnice, ze kterého se pak v průběhu celé práce vychází. Potom je provedena analýza napjatosti stávajícího modelu a na základě získaných výsledků jsou provedeny konstrukční změny v řešení ojnice. Nově upravená ojnice je opět zanalyzována s užitím MKP a nově získané výsledky jsou porovnány s výsledky původního modelu ojnice.

Závěr práce se zabývá citlivostní analýzou vybraných parametrů ojnice a jejich míru vlivu změny na výslednou pevnost ojnice. Potom je provedeno zhodnocení všech výsledků.

Klíčová slova

3-D model, ojnice, optimalizace, metoda konečných prvků, pevnostní analýza, redukované napětí

Abstract

This master thesis describes the design and optimization of connecting rod motor racing car. At the beginning of the whole work is a 3D-model of rods, from which then the whole work is based. Then it analyzes the current model of stress and on the basis of the results are made structural changes to the solution of rods. Newly adapted connecting rod is again analyzed using FEM and newly obtained results are compared with results of the original model of connecting rods.

The conclusion deals with sensitivity analysis of selected parameters of rods and their potential effect on the resulting changes in strength connecting rod. Then is an assessment of all results.

Keywords

3-D model, connecting rod, optimization, finite element method, reduced tension

Bibliografická citace

ULMAN, J. *Návrh a optimalizace ojnice motoru závodního automobilu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 91 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Beran.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce pana Ing. Martina Berana s použitím uvedené literatury.

V Brně, dne 28.5.2010

.....

Podpis

Poděkování

Za účinnou podporu a obětavou pomoc, cenné připomínky a rady při zpracování diplomové práce tímto děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Martinu Beranovi. Dále chci poděkovat svým rodičům za podporu při studiu na vysoké škole.

Obsah

| | |
|--|----|
| Obsah | 6 |
| Úvod | 8 |
| 1. Hlavní funkce spalovacího motoru | 9 |
| 1.1. Čtyřdobý zážehový spalovací motor | 9 |
| 2. Rešerše ojníc | 9 |
| 2.1. Ojnice čtyřdobého motoru | 9 |
| 2.1.1 Vyvažovací nákovky | 10 |
| 2.1.2 Oko pro pístní čep | 10 |
| 2.1.3 Dřík ojnice | 12 |
| 2.1.4 Délka ojnice | 12 |
| 2.1.5 Hlava ojnice | 13 |
| 2.1.6 Víko ojnice | 14 |
| 2.1.7 Ojniční šrouby | 15 |
| 2.1.8 Středící zářezy | 16 |
| 2.1.9 Výroba ojníc | 17 |
| 2.1.10 Použití v motorsportu | 18 |
| 3. Namáhání ojníc | 20 |
| 3.1. Ojniční oko | 20 |
| 3.1.1. Namáhání oka ojnice setrvačnou silou | 21 |
| 3.1.2. Namáhání oka ojnice silou od tlaku plynů | 22 |
| 3.2. Dřík ojnice | 22 |
| 3.3. Hlava ojnice | 23 |
| 3.3. Ojniční šrouby | 24 |
| 4. Technické parametry zadané ojnice | 25 |
| 4.1. Parametry motoru | 25 |
| 4.2. Parametry ojnice | 25 |
| 5. Tvorba 3-D modelu ojnice | 26 |
| 5.1. 3D model | 26 |
| 5.2. Scanování skutečného modelu | 28 |
| 6. Pevnostní analýza ojnice | 31 |
| 6.2. Příprava modelu k analýze | 31 |
| 6.3. Výpočet sil působících na ojnici | 32 |
| 6.3.1 Výpočet základních veličin klikového mechanismu: | 32 |
| 6.3.1 Výpočet dráhy pístu | 33 |
| 6.3.2 Výpočet rychlosti pístu | 33 |
| 6.3.3 Výpočet zrychlení | 34 |
| 6.3.4 Výpočet úhlové rychlosti, zrychlení a úhlu výkyvu ojnice | 35 |
| 6.3.5 Výpočet sil v klikovém mechanismu | 37 |
| 6.4. Import modelu z CAD do ANSYSU | 45 |
| 6.5. Postup při vysíťování ojnice | 45 |
| 6.5.1 Volba druhů elementů | 45 |
| 6.5.2 Volba materiálových vlastností: | 48 |
| 6.5.3 Vytvoření prutových náhrad pístního a ojničního čepu | 49 |
| 6.5.4 Zadání průřezů prutů horního a dolního oka | 50 |
| 6.5.5 Síťování objemu ojnice | 51 |
| 6.6. Zavazbení ojnice a zadání okrajových podmínek | 52 |
| 6.7. Pevnostní kontrola ojničních šroubů | 53 |



| | |
|---|-----------|
| 6.7.1 Tahové napětí v dřívku šroubu | 53 |
| 6.9. Výsledky pevnostní analýzy | 59 |
| 6.9.1 Stávající model ojnice | 59 |
| 6.9.2 Upravená ojnice | 60 |
| 6.9.3 Vliv změny délky ojnice na výslednou pevnost | 64 |
| 6.9.4 Vliv změny tloušťky ojnice na výslednou pevnost | 66 |
| 7. Zhodnocení získaných výsledků | 75 |
| Seznam použité literatury | 78 |
| Seznam použitých symbolů a jednotek | 79 |
| Seznam příloh | 82 |
| Přílohy | 83 |

Úvod

Ojnice spolu s pístem tvoří klikový mechanismus, který je součástí každého pístového stroje. Ať už to jsou motory dvoudobé, čtyřdobé, spalovací turbíny nebo kompresory. Zabezpečuje přenos sil mezi pístem a klikovým hřídelem motoru. Svým výkyvem mění přímočarý vratný pohyb pístu na rotační pohyb klikového hřídele. U 4D motorů je namáhána proměnnou silou tah – tlak u 2D motorů je namáhána pouze na tlak. Vzhledem k časové proměnlivosti působících silových účinků je namáhána únavově. [1]. Z těchto důvodů musí být potlačeny všechny vrubové účinky. Přechody mezi dříkem ojnice a ojnicními oky musejí být plynulé.

Další požadavky, které klademe na ojnice jsou nízká hmotnost ojnice s důrazem na hmoty posuvné. Dále pak požadavek na vysokou tuhost horního a spodního ojnicního oka. [1]. K zaručení výše uvedených požadavků slouží v dnešní době použití moderních výpočtových metod s využitím nejmodernějších softwarových modulů.

Díky použití těchto modulů je možno například analyzovat silová působení přenášející se v klikovém mechanismu a pomocí těchto analýz poté s využitím metody konečných prvků provést kontrolní pevnostní výpočty a z nich poté navrhnout optimální konstrukční řešení. V dnešní době se již při řešení různých problémů z oblasti strojírenství nepoužívá analytických metod k výpočtu napětí a deformací. V těchto oblastech zejména také v automobilovém průmyslu je při řešení konstrukčních problémů využíváno výhradně metod konečných prvků - MKP.

Metoda konečných prvků je v současné době nejrozšířenější numerickou metodou na řešení vědeckých a především praktických inženýrských úloh mechaniky kontinua, které vedou na řešení parciálních diferenciálních rovnic. Metoda konečných prvků se uplatňuje v řešení úloh mechaniky a to ve staticce (výpočet deformací a vnitřních silových účinků), dynamice (výpočet vlastních frekvencí, vlastních tvarů kmitů a vynuceného kmitání), termomechanice (vedení tepla), hydromechanice (proudění tekutin) a v teorii elektrického a magnetického pole [5].

V oboru spalovacích motorů se MKP využívá zejména při výpočtu deformací a napětí součástí mechanicky a tepelně namáhaných, při výpočtech teplotních polí v součástech a subsystémech spalovacích motorů, při výpočtech proudění ve spalovacích motorech atd. Při všech uvedených aplikacích se uplatní řešení úloh statických, dynamických, stacionárních a nestacionárních [5].

1. Hlavní funkce spalovacího motoru

Spalovací motor je mechanický tepelný stroj, který vnitřním nebo vnějším spálením paliva přeměňuje jeho chemickou energii na energii tepelnou a na mechanickou energii působením na píst, lopatky turbíny, nebo s využitím reakční síly. Motor vykonává mechanickou práci a jako takový slouží coby pohon jiných strojních zařízení. Spalovací motory všech typů našly největší uplatnění zejména v dopravních a mobilních mechanizačních prostředcích všech druhů (nezávislá trakční vozidla, resp. lokomotivy, plavidla hladinová i ponorná neboli ponorky, motorová vozidla, letadla a vrtulníky, stavební a zemědělské stroje, vojenská speciální vozidla, nouzové generátory elektrického proudu atd.) [1].

1.1. Čtyřdobý zážehový spalovací motor

Čtyřdobý spalovací motor také nazýván čtyřtaktní motor nebo zkráceně jen čtyřtakt je pístový motor pracující na čtyřech pohybech pístu. První čtyřdobý spalovací motor, který využíval benzín, sestavil v roce 1876 německý inženýr Nicolaus Otto. Ve srovnání s v té době dominujícím parním strojem, byl menší, lehčí a postupem času i tišší, čistší a především účinnější, byť dosažení spolehlivosti parního stroje trvalo mnoho dalších desítek let. Vynález spalovacího motoru dal impuls odbytu a zpracování ropy. V prvních deseti letech jeho existence se ho prodalo deset tisíc kusů.

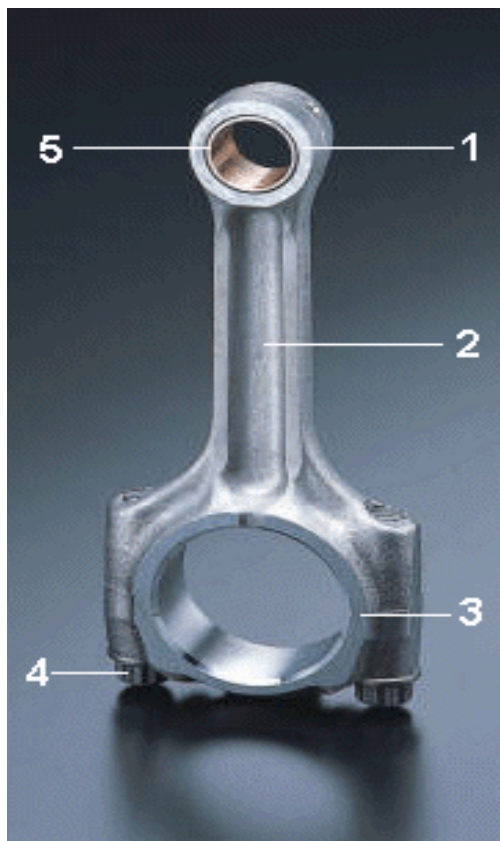
2. Rešerše ojníc

2.1. Ojnice čtyřdobého motoru

Na rozdíl od ojnice 2D motoru má dělené spodní oko, protože klikový hřídel čtyřdobých motorů bývá v převážném případě konstrukcí nedělený [2]. Na **obr.6** je uveden podrobný popis ojnice čtyřdobého motoru.

Obr. 2.1 – Popis ojnice [2].

- 1 – ojniční oko
- 2 – dřík ojnice
- 3 – hlava ojnice
- 4 – ojniční šroub
- 5 – pouzdro oka ojnice



2.1.1 Vyvažovací nákovky

Při sériové výrobě ojnice umožňují odbrušování materiálu dosáhnout stejné hmotnosti posuvných a rotačních hmot ojnice, které jsou důležité z hlediska kmitání motoru [2]. Tato metoda se používala dříve.

V současné době se však většinou ojnice již při výrobě zařazují podle hmotnosti posuvných a rotačních částí do různých hmotnostních tříd a pro užití na motoru se užívají pouze ojnice stejné hmotnostní třídy.



Obr. 2.2 – Umístění vyvažovacích nákovků [2].

2.1.2 Oko pro pístní čep

Pístní oko se provádí pouze jako uzavřené jen u velkých lodních motorů je možné je z rozměrových důvodů provést jako dělené.

Uložení pístního čepu může být provedeno 2 způsoby. Uložení u plovoucího pístního čepu může být tvořeno bronzovým pouzdem zalisovaným do otvoru v oku. Po vyvrtání mazacího otvoru, případně zajištění pouzdra proti pootočení je vystružen vnitřní průměr ložiska. Dále je možností zalisování tenkostěnné ocelové pánve s výstelkou z olověného bronzu do vystruženého otvoru v oku ojnice.[10].

U značně zatížených přeplňovaných vznětových motorů bývá v některých případech použito řešení s lichoběžníkovým tvarem příčného průřezu ojnicního oka. Výhodou tohoto tvaru je, že velké měrné tlaky vyvolané vysokými spalovacími tlaky jsou přenášeny větší stykovou plochou pístního čepu a oka ojnice. Menším setrvačným silám odpovídá menší styková plocha obou součástí. Současně se tím vyrovnává i mazací vrstva mezi čepem a ložiskovým pouzdem. Při mazání oka stříkáním oleje má oko pro pístní čep mazací otvor [2]. viz.obr.2.5.

Vozidlové motory používají nejčastěji plovoucí pístní čep jehož rozměry určují konstrukci ojnicního oka. Pístní čep se začne volně protáčet v oku pístu z hliníkové slitiny až po ohřátí na 100 až 120⁰C. Plovoucí provedení umožňuje rovnoměrné rozložení tlaků na styčné plochy a rovnoměrné opotřebení celého obvodu čepu, což znamená vyšší životnost uložení. Přechod z dřívku do oka má být co nejtáhlejší a nemá se zužovat, jinak má ojnice

v tomto místě snahu se trhat. V přechodu z ojničního oka do dříku se dělá mazací otvor, kterým vystřikuje olej a dopravuje se přes stěnu pístu na spodní stranu dna pístu, který se tímto ochlazuje. Přestože je množství oleje relativně malé, odvádí dostatečné množství tepla ze dna pístu

Pevně uložený čep se používá málo, i když má menší průměr i ložnou délku v oku ojnice, zvětšuje tuhost oka a zmenšuje náklon ojnice ve válci při porovnání s plovoucím čepem. Ložná délka pevného čepu je v okách pístu větší než u plovoucího čepu [10].



Obr. 2.3 – Lichoběžníkové ojniční oko [1]. **Obr. 2.4** – Vývrt dříku ojnice pro přívod oleje [2].



Obr. 2.5 – Otvory pro přívod oleje do stykové plochy [2].

2.1.3 Dřík ojnice

Dřík ojnice mívá nejčastěji profil **I**. Vnější žebra se v přechodu do hlavy ojnice rozšiřují pro zvýšení tuhosti a pevnosti. Stojina se umísťuje v ose válce. Malé vyosení, které se dělá pro zmenšení rozteče mezi sousedními válci a uložení za každým druhým zalomením, někdy způsobuje nerovnoměrné opotřebení ojnicních ložisek. [10]

V současné době je používán pro zážehové a vznětové motory příčný profil tvaru **I**, pro některé motory závodních automobilů pak profil **H**. Poměr výšky a šířky profilu **I** bývá v mezích 1,3 až 1,6.[10]

2.1.4 Délka ojnice

Délka ojnice bývá asi 1,6 – 2,0 Z (Z = zdvih pístu). Z tohoto důvodu je lepší uspořádání s menším zdvihovým poměrem, protože poměrná délka ojnice se zvýší a normální síla na válec z tlaku plynů se sníží. [10]

Při volbě malého vrtání a velkého zdvihu, musíme použít ojnici na spodní hranici délky. Toto řešení je výhodné, protože má být ojnice z hlediska tuhosti nejkratší, ale hodnota pod 1,6Z nepříznivě ovlivňuje mechanickou účinnost. V praxi se délka ojnice odvíjí od požadavku, aby se píst v DÚ přiblížil co nejvíce vývažkům klikového hřídele (plášť pístu se někdy upravuje vybráním pro vývažky). Délka ojnice se nejčastěji pohybuje v rozsahu 1,5 – 1,75Z. [10]



Obr. 2.6 - Ojnice s dříkem o průřezu **H** [4].



Obr. 2.7 – Ojnice s dříkem o průřezu **I** [1].



Obr. 2.8 – Ojnice s dříkem vyztuženým žebrem [2].

U dříku je nutno zabezpečit, vzhledem k únavovému namáhání, hladké přechody mezi dříkem a ojnicním okem pro pístní čep a hlavou ojnice, zaoblení všech hran a stoprocentní kontrolu dříku ojnice na výskyt trhlinek. U některých ojnic závodních motorů se v poslední době objevují dříky tvarované dle **obr.2.10**. [2].

2.1.5 Hlava ojnice

Hlava ojnice má být lehká, ale co nejtužší, aby se neporušila činnost tenkostěnných ložiskových pánví. Tuhost hlavy se zvětšuje plynulými přechody k dříku ojnice. Zatěžující síly se pak rozloží na délku ojnicního ložiska rovnoměrněji a sníží se zhuštěná napětí. Rozměry a hmotnost hlavy se zmenší, umístí-li se ojnicní šrouby co nejbližší k čepu. [10]. Dělicí rovina hlavy ojnice bývá u motorů o průměru ojnicního čepu do $0,65D$ kolmá na osu ojnice. Při větších průměrech ojnicního čepu vychází hlava s takto umístěnou dělicí rovinou příliš široká. Řešením je umístění dělicí roviny hlavy ojnice do roviny šikmé k ose ojnice pod úhlem 30° , 45° nebo 60° viz **obr.2.11**. [10]

Hlava ojnice se šikmou dělicí rovinou však vychází vzhledem k nepříznivému rozložení napětí a nutnosti konstrukčního řešení zachycení sil působících v dělicí rovině hlavy, hmotnější. Zachycení sil v dělicí rovině zabezpečuje ozubení vyfrézované v dělicí rovině [2].



Obr. 2.9 – Hlava ojnice se šikmou dělicí plochou [2].

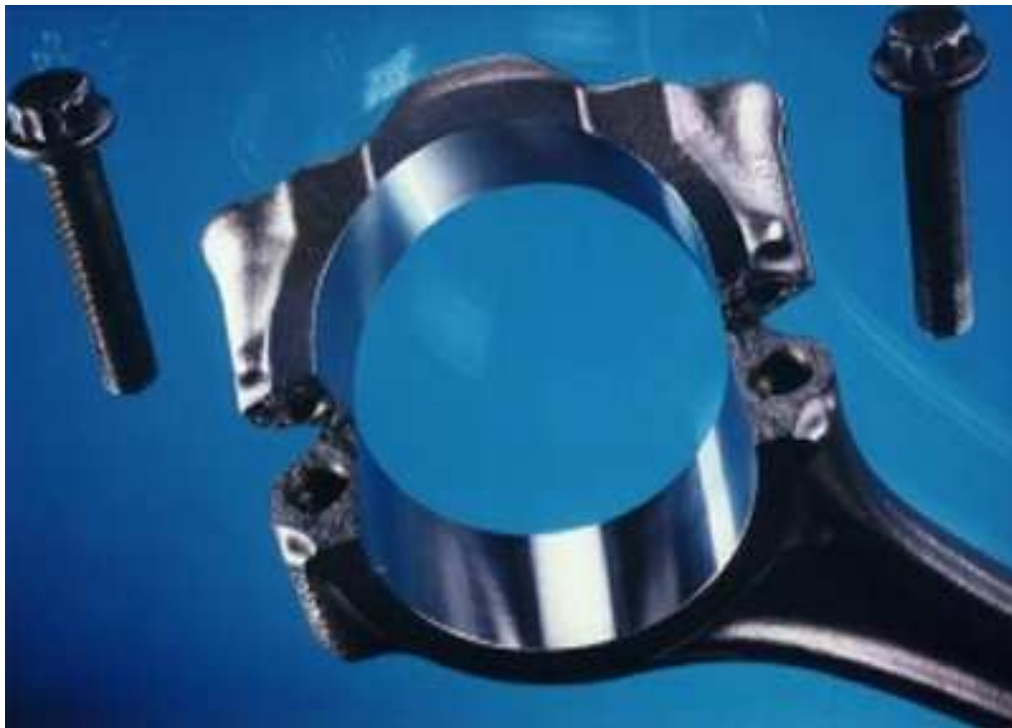
2.1.6 Víko ojnice

Je připevněno k hlavě ojnice ojničními šrouby. Poloha víka ojnice vůči hlavě ojnice je zabezpečena středící válcovou plochou ojničního šroubu. Přesné polohování víka ojnice vůči hlavě ojnice zabezpečuje, že obrobení otvoru pro uložení ložiskových pánví, který je vyráběn ve smontovaném stavu, bude i při montáži zachována potřebná kruhovitost a válcovitost ložiskové pánve. Aby nedošlo k záměně a přetočení víka ojnice, jsou stejné strany víka a hlavy ojnice označeny stejným číslem. Řešením je vytvoření dělicí roviny hlavy a víka řízeným lomem. Zde není možné zaměnit víko jedné ojnice za víko druhé ojnice a přetočit víko ve vztahu k ojniční hlavě, ale náklady na výrobu jsou nižší. Porovnání výkovků ojnice s klasickým řešením středění víka ojnice a výkovku ojnice se středěním řízeným lomem je uvedeno na obr.12 [10].

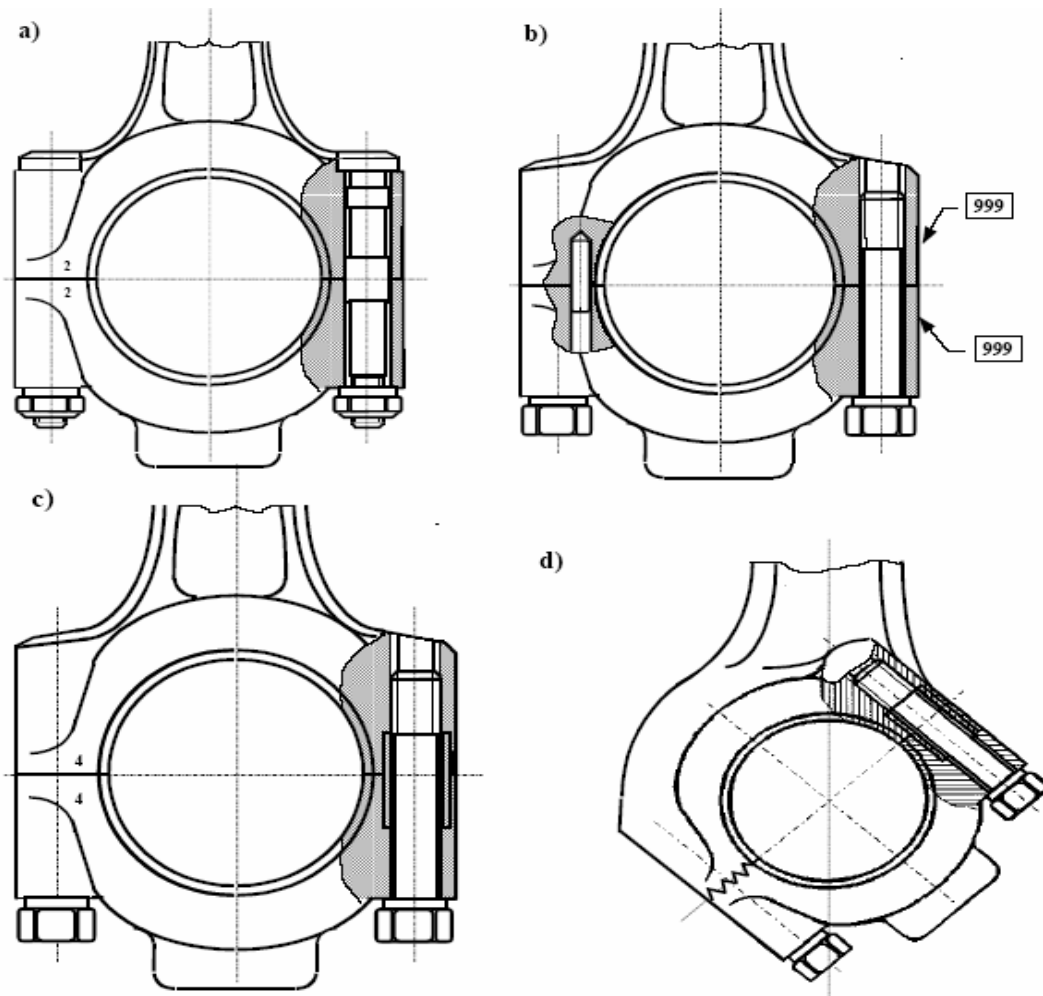
Všechny obráběné plochy jsou vyrobené již před roztržením. Vzniklý lom musí být křehký a nesmí nastat žádné plastické deformace. Poprvé byl tento způsob výroby použit u ojnice ze spěkaného kovu u firmy BMW. Později byly vyvinuty materiály umožňující vytvoření křehkého lomu u ojnic litých i kovaných [10].

Polohování víka ojnice:

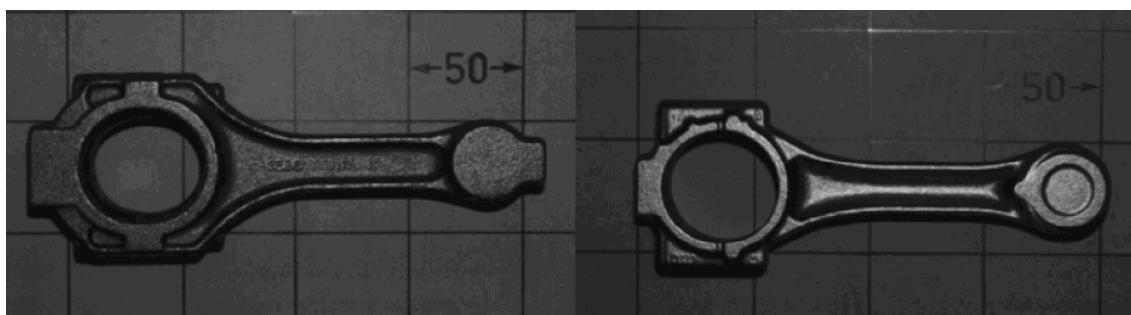
- a) Válcovou plochou na dřívku ojničního šroubu
- b) Dvojící válcových kolíků
- c) Broušenou vložkou



Obr. 2.10 – Polohování víka ojnice pomocí řízeného křehkého lomu [2].



Obr. 2.11 – Polohování víka ojnice: **a)** válcovou plochou na dřívku ojničního šroubu, **b)** dvojicí válcových kolíků, **c), d)** broušenou vložkou. [2].



a)

b)

Obr. 2.12 – Výkovek ojnice [2]: **a)** klasické, **b)** s dělicí rovinou tvořenou lomem

2.1.7 Ojniční šrouby

Osa ojničního šroubu má být umístěna co nejblíže k ose čepu kliky. Tloušťka stěny mezi šroubem ložiskovou pánví v dělicí rovině je jen asi 1 až 1,5 mm. Umístění šroubů do těsné blízkosti ložiskových pánví omezuje rozevírání dělicí roviny a tím i deformace ložiska. Pro

omezení ohybového namáhání ojnicního šroubu by se osa šroubu měla nacházet v těžišti styčné plochy víka a hlavy ojnice [2].

Ojnicní šrouby se řeší jako průchozí, u šikmo dělené hlavy se musí použít šrouby zavrtané, které dále komplikují návrh ojnice. Šrouby a matice se používají speciálně vyrobené z velmi kvalitních materiálů. Závit se vyrábí válcováním pro zvýšení pevnosti. Přesný tvar šroubu se určuje podle návrhu ojnicního oka a tak nelze používat šrouby jiné. Totéž platí i pro matice. Pro extrémně namáhané ojnice závodních automobilů se používají šrouby se zúženým dříkem, které jsou pružnější a přestože mají menší průřez, jejich únavová pevnost je vyšší [10].

Ojnicní šrouby jsou namáhány proměnným dynamickým zatížením. Hlavní zatížení vyvolávají setrvačné síly posuvných hmot pístní skupiny a ojnice a rotačních hmot ojnice bez jejího víka. Při malé tuhosti hlavy ojnice dochází k deformaci, která vyvolá přídavné ohybové namáhání ojnicních šroubů. Taktéž nedodržení kolmosti dosedací hlavy šroubu, k ose šroubu vyvolá přídavné ohybové namáhání. Vzhledem k tomu, že toto namáhání není při výpočtu uvažováno může způsobit utržení šroubu. [3]

Průměr dříku ojnicního šroubu by měl být menší než vnitřní průměr závitu. Prakticky se volí plocha průřezu dříku 80% plochy jádra závitu. Délka dříku o tomto průřezu má být co nejdelší. Při ohybovém namáhání dlouhých, pružných dříků je amplituda napětí nižší a šroub tak lépe odolává únavovému namáhání. Závit šroubu bývá metrický s upraveným profilem pro snížení koncentrace napětí. Je na dříku šroubu naválcován. Pro ojnicní šrouby u zážehových motorů se používají závity s jemným stoupáním, např. M8 x 1 a M10 x 1. U vznětových motorů pak M12 x 1,5 a M14 x 1,5. Jako materiál se používá vysoce legovaná ocel zušlechťená na 1000 MPa, např. 13240, 15260 [3].



Obr. 2.13 – Konstrukční provedení ojnicních šroubů [2]

2.1.8 Středící zářezy

Zabezpečují polohování tenkostěnných ocelových pánví při montáži ojnice na klikový čep. Proti pootočení za provozu motoru jsou ložiskové pánve chráněny celkovým přesahem vnějšího průměru obou polovin pánví ve vztahu k průměru vývrtu v hlavě ojnice. Přesah dosahuje hodnoty (0,04 až 0,08) mm, a volí se podle tloušťky pánve a průměru klikového čepu.

2.1.9 Výroba ojnic

Ojnice se nejčastěji vyrábí kováním v zápustce. Proto vnější povrch ojnice má úkosy [3]. Používají se oceli třídy 11 až 15. Materiál třídy 16 se používá na ojnice přepřínovaných motorů, materiál 13240 se doporučuje pro vznětové motory.

Pro malé motory a kompresory se ojnice vyrábí z litiny. U těchto motorů se objevují i ojnice lisované z plechu, ojnice z lehkých slitin a ojnice z kompozitních plastů.[3]

Pro benzínové motory se v ojedinělých případech používají ojnice kované z lehkých slitin (hliník legovaný niklem a mědí), pro závodní motory se používá titan a jeho slitiny. Pro jiné mechanické vlastnosti titanu proti oceli má titanová ojnice o něco odlišnější tvar v přechodech, výroba je drahá a obtížná (tvrdost titanu odpovídá tvrdosti korundu a prakticky se dá jenom brousit, běžné soustružnické nože ze slinutých karbidů hoří). [3]

Při výrobě ojnice se obrábí víko ojničního oka společně s ojnicí a oba díly se označí stejným číslem, většinou číslem válce, ve kterém budou pracovat. Ojnice vyráběné novou technologií spékáním kovových prášků mají několik dobrých vlastností, výroba je méně energeticky náročná, prakticky se nevytváří odpad a téměř odpadá finální obrábění. Princip je ve slisování přesně složeného kovového prášku do formy, kde se po stlačení lisem zahřeje. Jednotlivá zrnka kovu se k sobě spečou a vyrobí díl přesně podle formy. [10].

Ojniční oko je vyrobeno jako celek, rozdělení se provádí zlomením na speciálním stroji. Lom je drsný a obě části do sebe přesně zapadnou podle lomové drsnosti, tím se zabezpečí neproměnná poloha obou částí vůči sobě. Díky rovnoměrnému prohřátí materiálu při spékání nedochází k pnutí materiálu a není potřeba dalších tepelných úprav [10].

Úprava ojnice spočívá ve vyleštění povrchu podobně jako u klikového hřídele. Odběr materiálu pro snížení hmotnosti vždy sníží únavovou pevnost a tak sníží životnost ojnice na počet ujetých km. Ztenčování dřívku ojnice se musí provádět až po důkladném provedení na zhuštěná napětí a pevnost. [10].



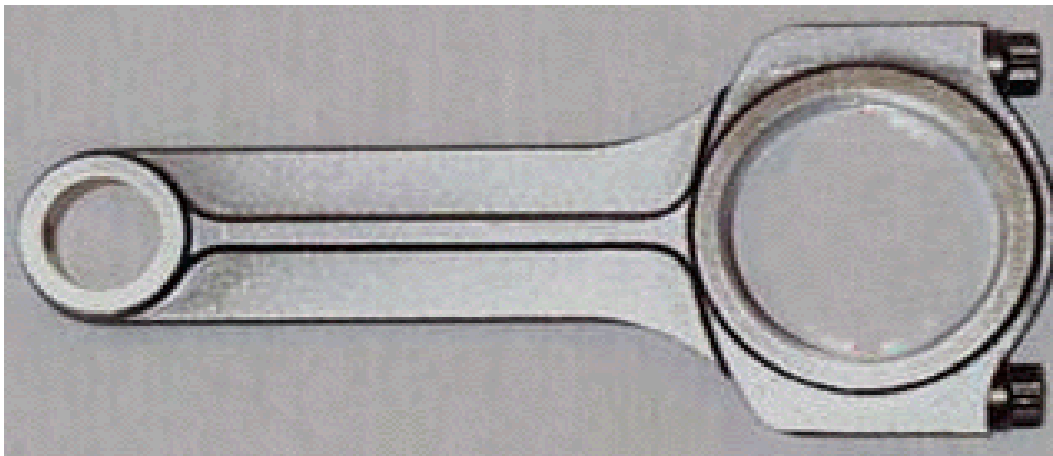
Obr. 2.14 – Broušení dosedací plochy [9]



Obr. 2.15 – Zápustka [9]

2.1.10 Použití v motorsportu

Na následujících obrázcích jsou některá konstrukční řešení ojníc používaných ve sportovních motorech jak v USA tak i v Evropě. Na obrázku 2.15. můžeme vidět konstrukční řešení ojnice do kříže pro sportovní motory používané zejména v USA.



Obr. 2.15 – Ojnice do kříže [2].

Na **obr.2.16** je konstrukční řešení ojnice používané ve sportovních motorech Fordu, v tomto případě se jedná o ojnici z motoru Ford Escort RS 2000. Na obrázku si můžeme všimnout zesílení hlavy a víka v ojnice v místě jejich styku.



Obr. 2.16 – Ojnice Ford Escort RS [2].

Dalším zajímavých konstrukčním řešením, které používá firma Porsche je přitažení ojnicí hlavy ojnice k víku ojnicími šrouby, které přitahují víko shora. (Viz.**Obr.2.17**).



Obr. 2.17 – Ojnice Porsche[7].

Na **obr.2.18** a **2.19**. jsou současná řešení hlavy ojnice moderního motoru pro sportovní účely. **Obr.2.19** ukazuje řešení ojnice, použité zejména u vozů Subaru.



Obr. 2.18 – Současná provedení [2].



Obr. 2.19 – Ojnice ze Subaru [2].

3. Namáhání ojnic

Ojnice je během provozu namáhána:

- Tlakem od plynů působících na dno pístu
- Namáháním na vzpěr od tlaku plynů
- Namáháním dřívku na ohyb vlivem neustálého kývavého pohybu dřívku kolem osy pístního čepu
- Namáháním od setrvačných sil ve formě tahových a tlakových sil

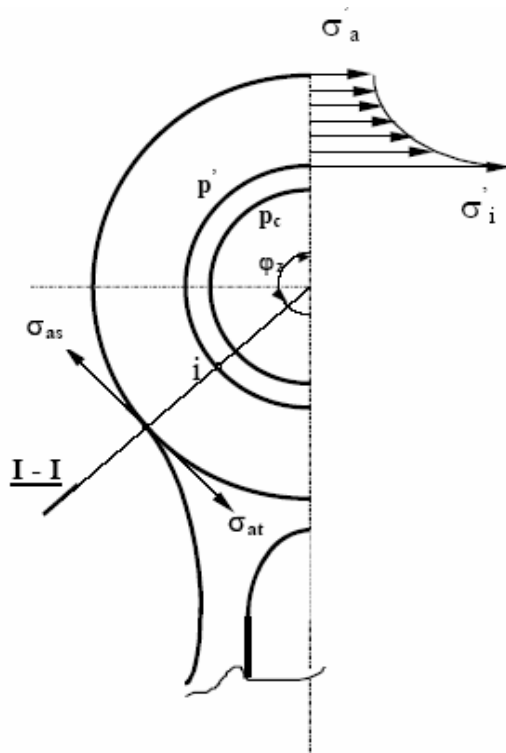
3.1. Ojniční oko

Ojniční oko je zatíženo [4] :

- Silami od tlaku plynů působících při spalování na dno pístu
- Setrvačnými silami posuvných hmot pístní skupiny
- Předpětím od zalisování a ohřevu ložiskového pouzdra

Nejvíce namáhaným průřezem oka ojnice, v němž dochází často k lomům je průřez **I-I** (viz.obr. 3.1.) přechodu oka ojnice do dřívku. Jeho namáhání je složité a je vyvoláno všemi uvedenými zatíženími. Je třeba uvážit dynamický charakter zatěžujících účinků, tedy únavové namáhání.

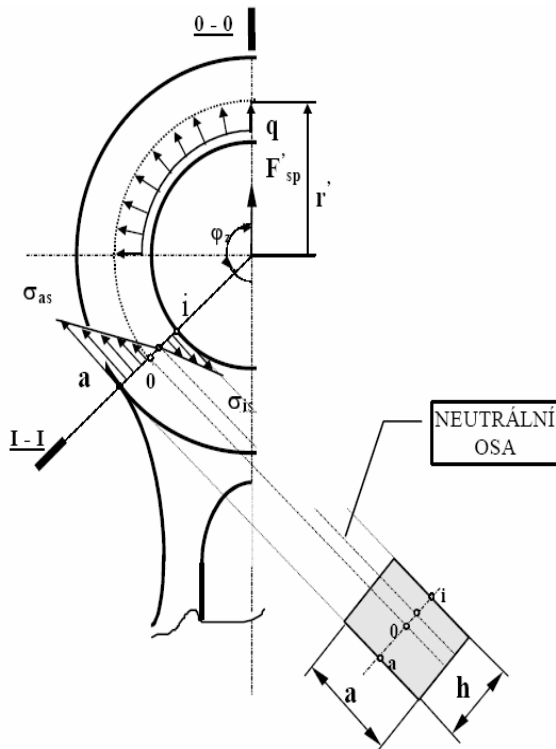
Tlaková síla se někdy považuje za jedinou sílu, která namáhá oko na tlak. Tlakové a setrvačné síly jsou proměnlivé. Výpočet na únavu se provádí pro režimy chodu motoru, při nichž jsou amplitudy cyklu napětí největší [4].



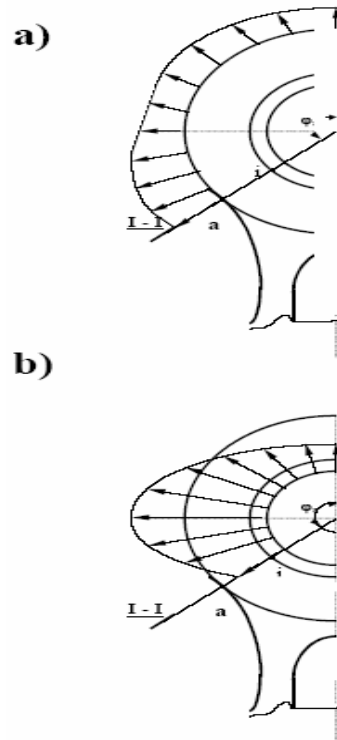
Obr. 3.1 – Ojniční oko [4]

3.1.1. Namáhání oka ojnice setrvačnou silou

Je vyvoláno posuvnými hmotami pístní skupiny, přičemž maxima je dosaženo při doběhu pístu do horní úvrati mezi výfukovým a sacím zdvihem.

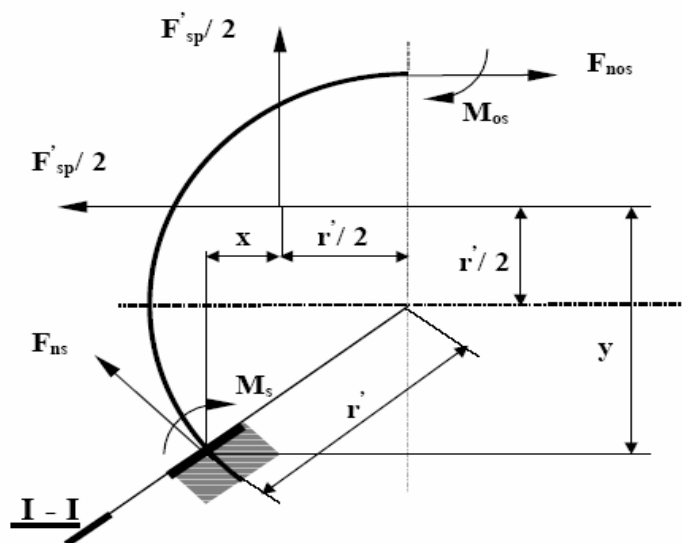


Obr. 3.2 – Průběhy zatížení a napětí v ojnicím Oku [4]



Obr. 3.3 – Průběh napětí: a) ve vnějších vláknech, b) ve vnitřních vláknech [4]

Oko ojnice je zatěžováno setrvačnou silou. Setrvačná síla se vždy počítá při největších otáčkách motoru. Pro výpočet napětí vyvolané touto silou nahrazujeme oko ojnice (bez ložiskového pouzdra) modelem, silně zakřiveným prutem kruhového tvaru o poloměru r' a s vetknutím v bodě 0 průřezu I-I (viz.obr.3.1) [4].

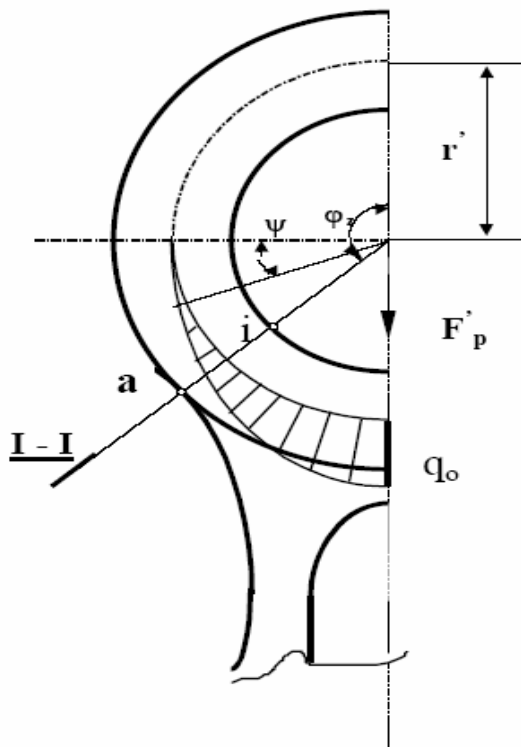


Obr. 3.4 – Model prutu [4]

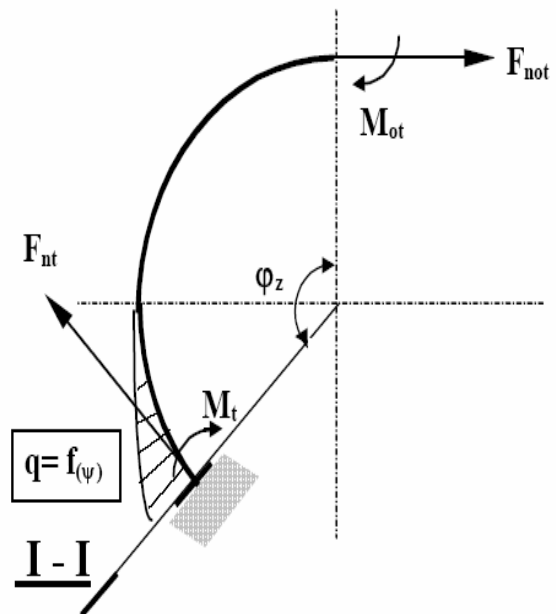
Všechny průřezy oka kolmé na střední kruhové vlákno jsou namáhány kombinovaně na ohyb a na tah. Ve vnějších vláknech vznikají normálová napětí. Jejich největší hodnota je v průřezu **I-I** v místě ukotvení oka do dřívku ojnice [4].

3.1.2. Namáhání oka ojnice silou od tlaku plynů

Stejně jako v předchozím případě je prutové těleso nahrazeno prutovým modelem. Jedná se o silně zakřivený prut vetknutý opět v průřezu **I-I**. Výsledné vnitřní účinky v průřezu **I-I** jsou normálová síla F_{not} a ohybový moment M_{ot} dle obr.3.5.



Obr. 3.5 – Namáhání tlakovou silou [4]



Obr. 3.6 – Model prutu [4]

Tlakové síly z působení tlaku plynů se rozloží na spodní poloválcové části ojničního oka podle kosinusovky.

Skutečné rozložení tlaků ovšem závisí na tuhosti oka, pístního čepu, vůli mezi čepem a pouzdrem a na profilu hydrodynamických tlaků v mazací olejové vrstvě oleje [3].

3.2. Dřík ojnice

Dřík ojnice je namáhán:

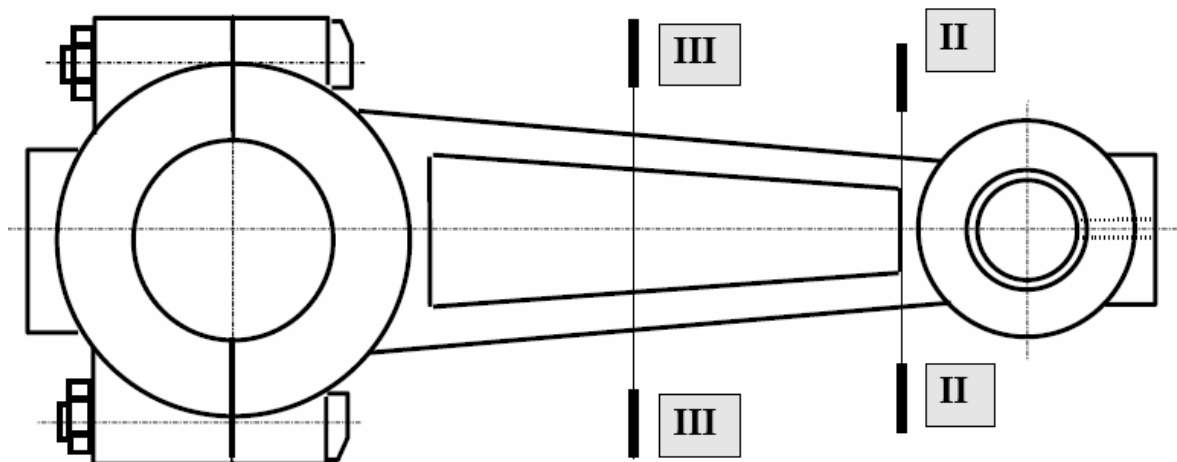
Tahovou setrvačnou silou posuvných hmot

Tlakovou silou od tlaku plynů zmenšenou o setrvačné síly posuvných hmot

Příčným momentem z kývání ojnice

Namáhání je cyklické, střídavé a maximum tahu je dosaženo při doběhu pístu do horní úvratí mezi výfukovým a sacím zdvihem. Maximum tlaku odpovídá dosažení maximálního tlaku plynů nad pístem v průběhu spalování [4].

Pevnostní kontrola dířku ojnice se provádí ve 2.průřezech. V minimálním průřezu **II-II** a středním průřezu **III-III** (viz.obr.3.7).



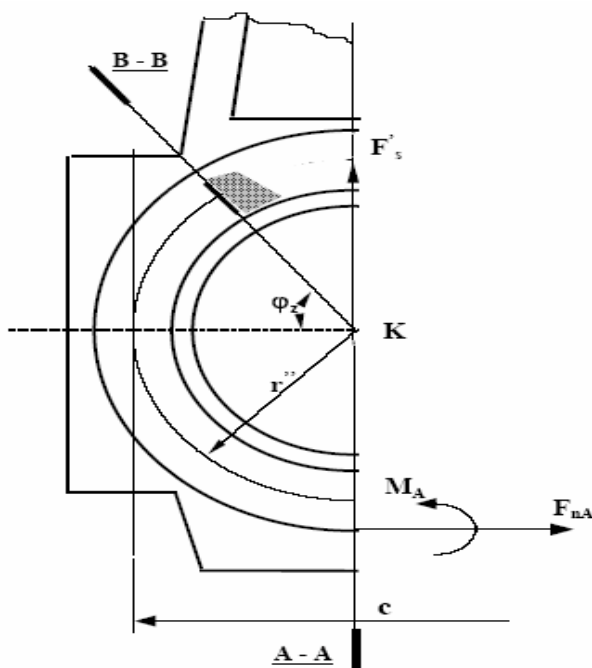
Obr. 3.7 – Kontrolní průřezy ojnice [4]

Maximální síla namáhající průřez **II-II** tah je setrvačná síla posuvných hmot pístní skupiny a části ojnice nad průřezem **II-II** při doběhu pístu do horní úvratí.

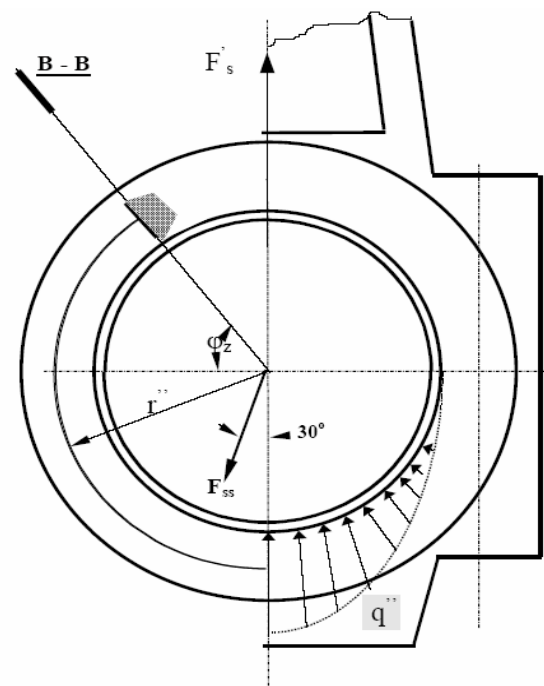
V průřezu **III-III** je maximální tahové namáhání vyvoláno maximální velikostí setrvačné síly posuvných hmot pístové skupiny a hmotnosti části ojnice nad průřezem **III-III**.

3.3. Hlava ojnice

V důsledku působení setrvačné síly posuvných a rotačních hmotností, je maxima dosaženo při doběhu pístu do horní úvratí při maximálních otáčkách motoru. V nebezpečných průřezích označených na **obr.3.8** vznikají příčná napětí.



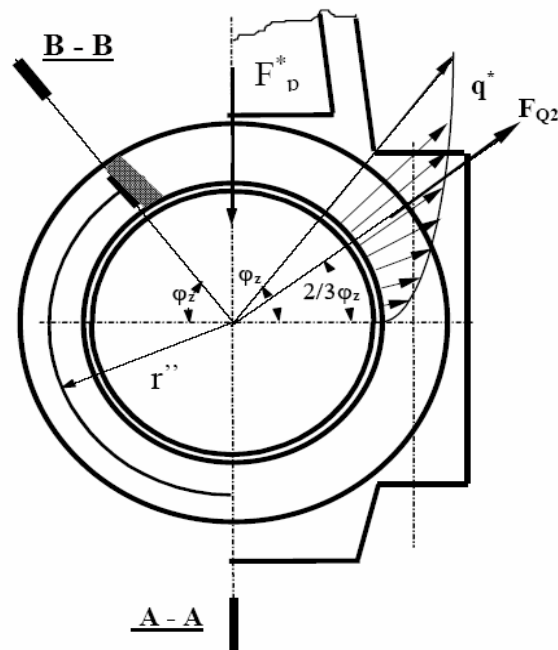
Obr.3.8 – Kontrolní průřezy [4]



Obr.3.9 – Zatížení od setrvačné síly [4]

Průřez **A-A** je namáhán kombinovaně na ohyb a na tah. Ohybové namáhání vyvolá ohybový moment a tah vyvolá normálová síla.

Průřez **B-B** je zatížen setrvačnou silou, silou od tlaku plynů a setrvačnými silami působícími v ose dráky ojnice. Extrémních hodnot cyklického zatěžování je opět dosahováno jsou-li setrvačné síly dosaženy v horní úvratí pístu. Setrvačná síla je zachycována víkem ojnice. A síla od tlaku plynů je-li dosaženo maximálního spalovacího tlaku. Průřez **B-B** je také zatížen tlačnou silou (viz. **obr.3.10**), která působí v ose ojnice. Celkově je průřez **B-B** namáhán kombinovaným namáháním na tah, ohyb a smyk.

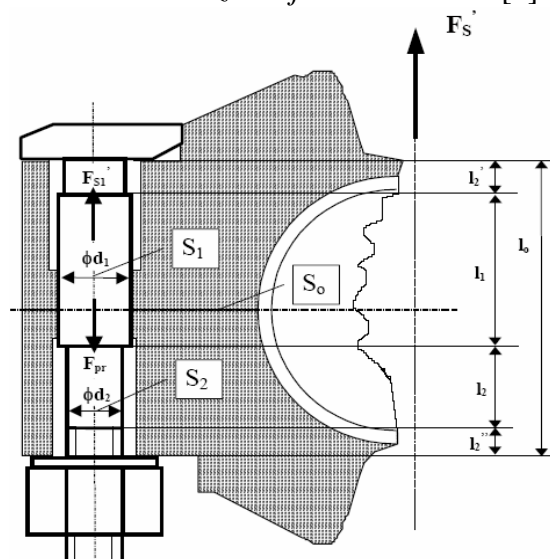


Obr.3.10 – Zatížení od tlačné síly [4]

3.3. Ojniční šrouby

Největší zatížení ojničních šroubů vzniká z působení setrvačné síly posuvných a rotačních hmotností ojnice (bez hmotnosti víka), je-li píst v horní úvratí [3]. A samozřejmě také statická síla předpětí.

Obr.3.11-Zatížení ojničního šroubu [4]



4. Technické parametry zadané ojnice

V této diplomové práci jsem prováděl analýzu ojnice výkonného zážehového motoru od firmy Opel. Ojnice, kterou jsem analyzoval, je použita v motoru, který je používán především pro sportovní účely. Lze tedy předpokládat velká zatížení této ojnice.



Obr.4.1 - Motor Opel Vauxhall 2.0 XE [11]



Obr.4.2 - Opel Astra 2.0XE [8]

4.1. Parametry motoru

Označení motoru:

Typ motoru

Zdvihový objem

Výkon motoru

Taktnost motoru

Počet válců

Kompresní poměr

Zdvih pístu

Vrtání válce

Opel 2.0 XE 16V

Zážehový, přeplňovaný

$V_Z = 1998$ [cm³]

$P_e = 110$ [kW]

$\tau = 4$

$i_v = 4$

$\epsilon_K = 10.5$

$Z = 86$ [mm]

$D = 86$ [mm]

4.2. Parametry ojnice

Materiál ojnice:

Rozteč horního a dolního oka:

Vnitřní průměr horního oka(včetně pánve):

Vnější průměr horního oka:

Vnitřní průměr dolního oka:

Vnější průměr dolního oka:

Šířka horního oka:

Šířka dolního oka:

Šířka dřívku ojnice:

Rozteč ojnicních šroubů

16240.7

$L_{OJ} = 143$ [mm]

$D_{H1} = 21$ [mm]

$D_{H2} = 23$ [mm]

$D_{D1} = 52$ [mm]

$D_{H2} = 56$ [mm]

$H_H = 22$ [mm]

$H_D = 26$ [mm]

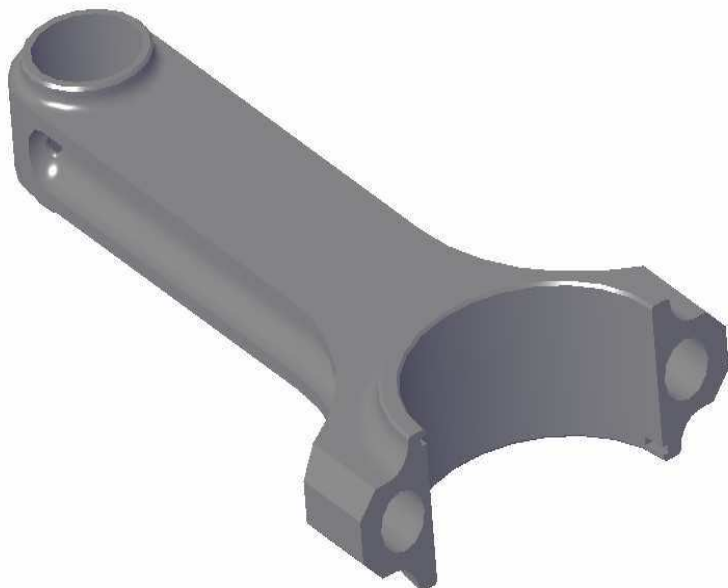
$T_{oj} = 30$ [mm]

$c = 65$ [mm]

5. Tvorba 3-D modelu ojnice

Dalším mým úkolem bylo namodelování ojnice. Jednotlivé části modelu jsem vytvořil v CAD systému ProEngineer a potom postupně složil do celku.

5.1. 3D model



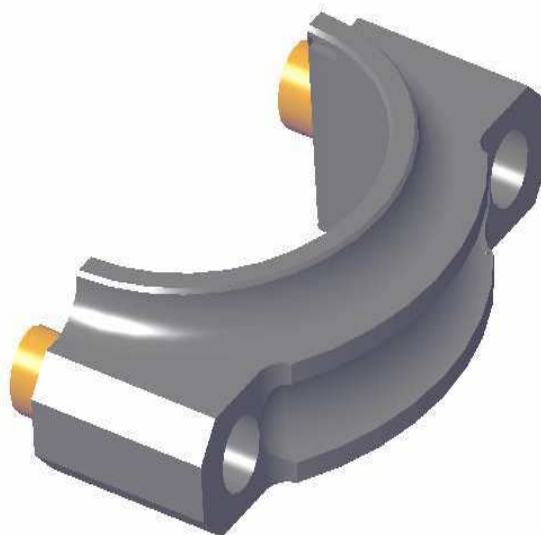
Obr.5.1 – Model hlavy ojnice



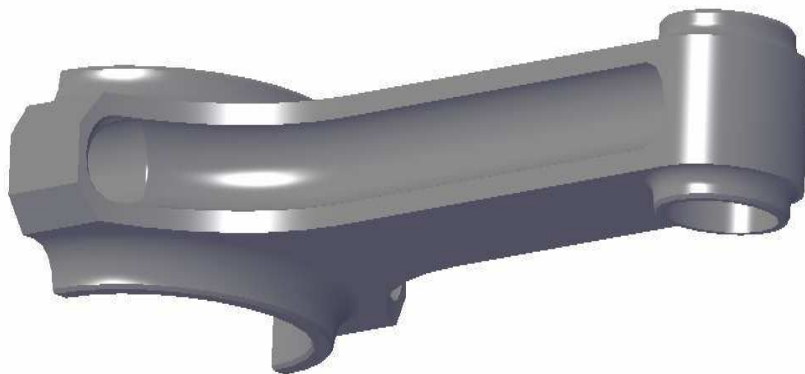
Obr.5.2.- Model pouzdra



Obr.5.3- Model pánve



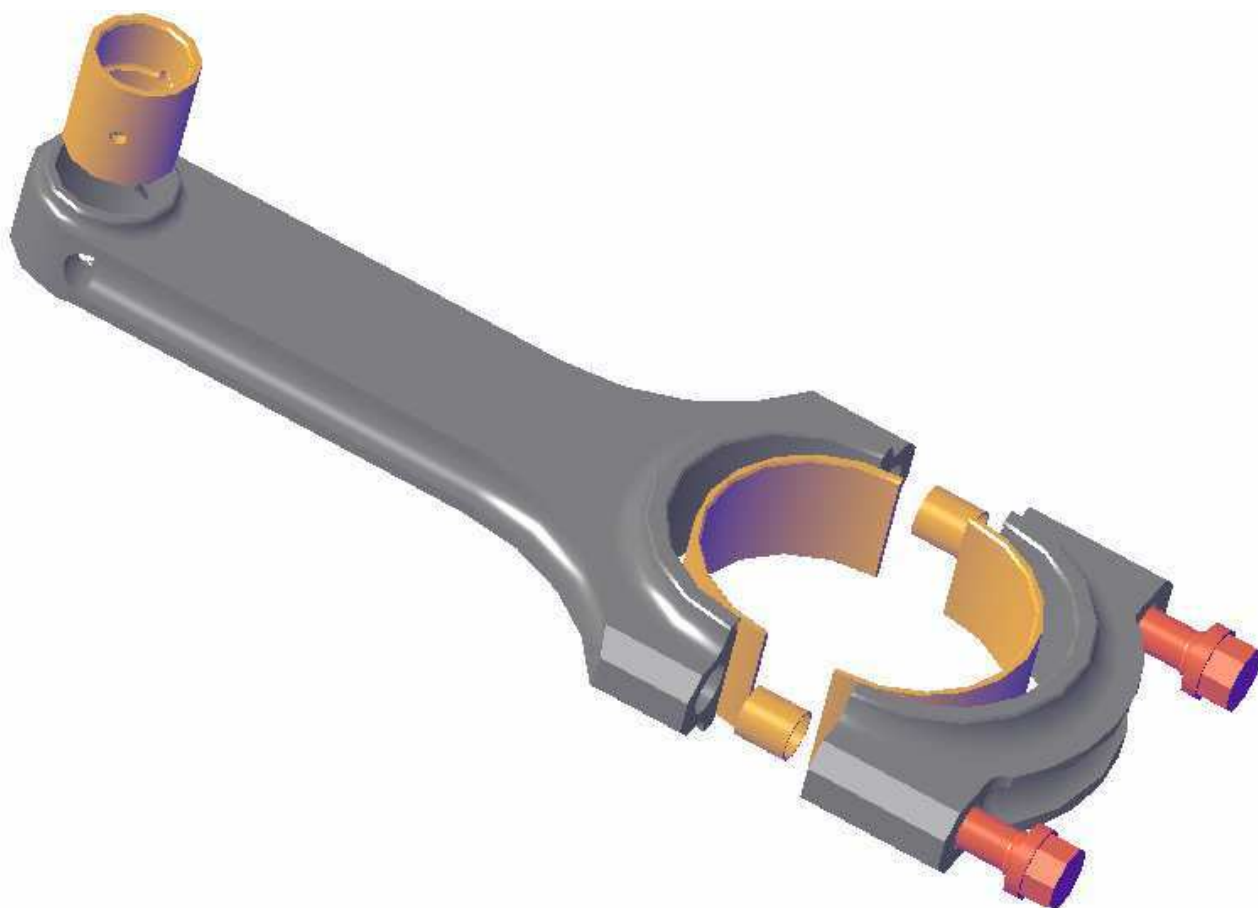
Obr.5.4 - Model víka s válcovými trubkami



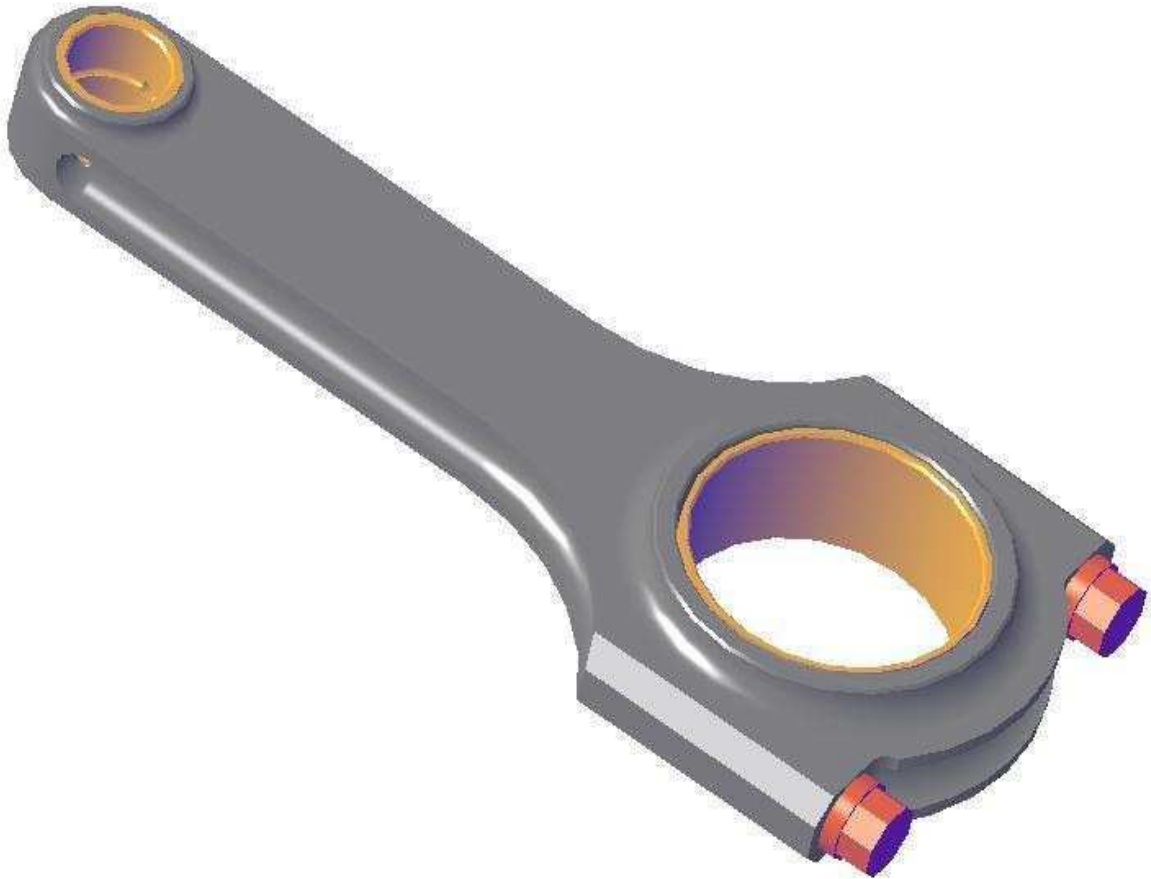
Obr.5.5 – Hlava ojnice – pohled shora



Obr.5.6- Model šroubu



Obr.5.7 – Složení jednotlivých částí do sestavy



Obr.5.8 – Kompletní sestava

5.2. Scanování skutečného modelu

Model ojnice, jak bylo řečeno byl 3D jsem vytvořil v CAD systému ProEngineer, ale pro lepší porovnání parametrů skutečné a namodelované ojnice jsem využil 3D pracoviště na našem ústavu. Model ojnice jsem neskenoval 3D scannerem ATOS.

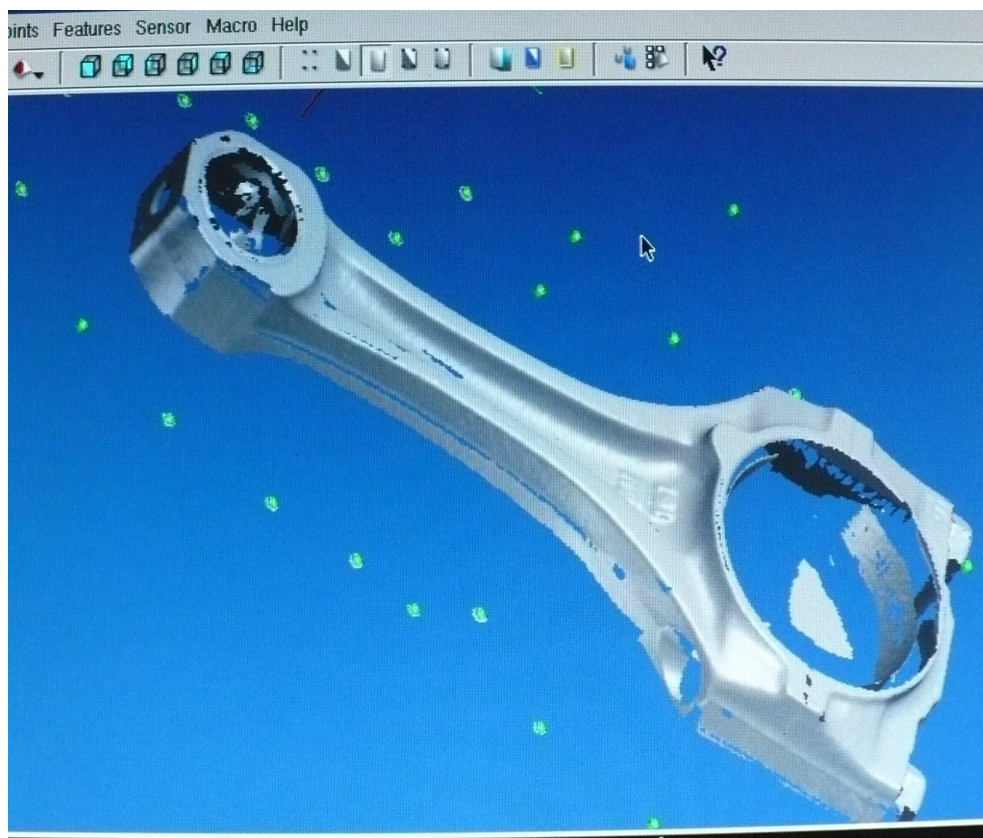
Přes veškerým skenováním je důležité pokrýt celou ojnici křídovou směsí. Ojnice leží na černé podložce a kolem ojnice jsou na podložce nalepené lokalizační body. Podmínkou jsou 3.viditelné body. Důležité je taky nastavení a zkalibrování samotného skeneru. Po té již následuje samotné snímání ojnice. U kompletně nasnímané ojnice došlo k náhodnému umístění souřadného systému v dřívku ojnice poblíž horního oka. Ale to nebyla v tomto případě žádná velká komplikace jelikož pomocí software skeneru ATOS nám umožňuje vytvořit přímky, plochy a také body. Pro další práci s ojnici bylo důležité získání os horního a dolního oka. K tomu byl využit válcový tvar obou ok.

Jednodušší možností bylo ale uložení celého nasnímaného souboru ve formátu STL a pro další zpracování bylo využito CAD systému. Tam jsme teprve vytvořili osy (Příkaz RESTYLE) a válcové plochy horní a dolního oka.

Vzhledem k tomu, že ojnice, která byla nasnímaná byla tvarově složitá, tak byly z této nasnímané ojnice odměřeny, délka ojnice, průměry obou ok a rozteč ojnicních šroubů. Pro další výpočty jsem namodeloval tvar ojnice s H – profilem (viz.obr.5.8), který se používá v podobně výkonném motoru a na který jsem aplikoval odměřené hodnoty. Toto řešení jsem zvolil proto, že při následujících MKP výpočtech ojnice by vzhledem k tvarové složitosti mohly nastat problémy s vysíláním ojnice v ANSYSU.



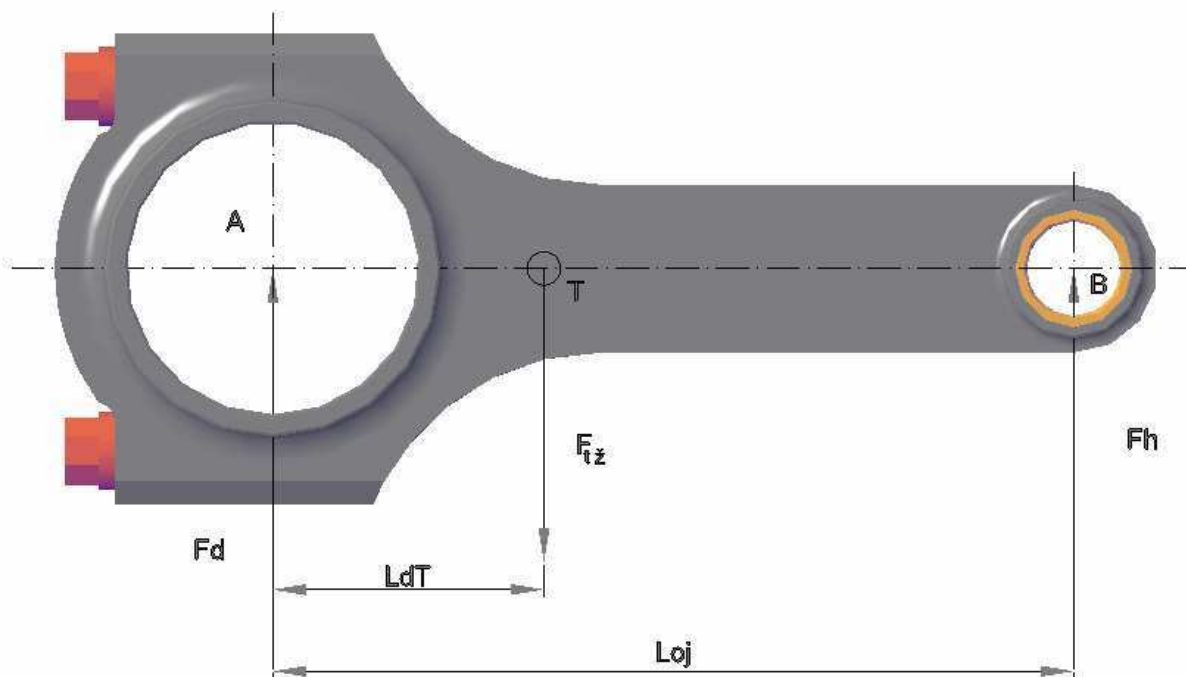
Obr.5.9 – Ojnice připravená ke snímání



Obr.5.10 – Průběh snímání ojnice

Z CAD systému jsem dále určil polohu těžiště ojnice, vzdálenost těžiště od horního resp.dolního oka a hmotnost ojnice. Z těchto hodnot jsem analyticky dopočítal hmotnost posuvných částí a rotačních částí ojnice. Jednodušší bylo odečíst tyto hodnoty z modelu ojnice přímo z CADU, ale já jsem zvolil možnost analytickou.

Na **obr.5.11** je model ojnice s vyznačenými rozměry a polohou těžiště. Pomocí momentové rovnováhy, kterou jsem provedl k dolnímu oku ojnice určíme příslušné hodnoty rotačních resp.posuvných částí ojnice.



Obr.5.11 – Momentová rovnováha

Hmotnost ojnice:

$$m_{oj} = 0,6108 \quad [\text{kg}]$$

Vzdálenost těžiště od dolního oka:

$$L_{DT} = 41,65 \quad [\text{mm}]$$

Momentová rovnováha k bodu A:

$$F_H * L_{OJ} - F_t * L_{dT} = 0 \quad (5.1)$$

$$F_H = m_1 * g \quad (5.2)$$

$$F_t = m_{oj} * g \quad (5.3)$$

$$m_1 * g * L_{OJ} - m_{oj} * g * L_{dT} = 0 \quad (5.4)$$

$$m_1 * g * L_{OJ} = m_{oj} * g * L_{dT} \quad (5.5)$$

Hmotnost posuvných částí ojnice

$$m_1 = \frac{m_{oj} * L_{dT}}{L_{OJ}} \quad (5.6)$$

$$m_1 = \frac{0,6108 * 0,04165}{0,143}$$

$$m_1 = 0,177 \text{ [kg]}$$

Hmotnost rotačních částí ojníc:

$$m_2 = m_{OJ} - m_1 \quad (5.7)$$

$$m_2 = 0,6108 - 0,177$$

$$m_2 = 0,433 \text{ [kg]}$$

6. Pevnostní analýza ojnice

Pevnostní analýza modelu ojnice jsem provedl v software ANSYS, který je nejpoužívanějším výpočetním softwarem v inženýrské praxi. Řešení úkolů je prováděno metodou konečných prvků MKP, která je založena na numerickém řešení parciálních diferenciálních rovnic.

Pro výpočet metodou MKP jsou v ANSYSU důležité následující moduly:

1. PREPROCESSING:
 - volba typu elementů
 - zadání reálných konstant
 - zadání materiálových vlastností
 - tvorba modelu
 - a) přímá generace
 - b) solid modeling
 - c) import CAD modelů
2. SOLUTION :
 - zadání okrajových podmínek
 - definice zatížení
 - řešení soustavy rovnic
3. POSTPROCESSING:
 - zobrazení výsledků řešení

6.2. Příprava modelu k analýze

Nyní máme již připravený model ojnice k analýze. Tento model můžeme nyní převést ze software PRO/E do Ansysu. Převod je možný provést dvěma způsoby. Buď pomocí převodního souboru vhodného formátu (formát *.igs) a nebo převodem pomocí specializovaných modulů. Jelikož jsou PRO/E a ANSYS vzájemně propojeny, tak jsem jako převodu využil druhé možnosti. V PRO/E vybereme možnost ANSYS – AnsysGeom a poté je vytvořen soubor s příponou *.anf, který potom otevřeme v ANSYSU v menu FILE => READ INPUT DATA FROM => požadovaný soubor.anf. Importovaný model je na obr.6.18.

Nyní máme načtený model ojnice a z hlediska dalších výpočtů je důležité tento model umístit vzhledem k souřadnému systému. Je to důležitá věc z hlediska umístění úhlového zrychlení a úhlové rychlosti ojnice, které budeme ve výpočtu zadávat. V mém případě jsem umístil souřadný systém do horního oka ojnice. Potom bude následovat uchycení ojnice, vytvoření prutových náhrad ok, vysíťování ojnice a zadání důležitých hodnot zatížení jako jsou síla od tlaku plynů, zrychlení pístní skupiny, úhlová rychlost a úhlové zrychlení ojnice. Veškerý postup bude popsán v následujících kapitolách.

6.3. Výpočet sil působících na ojnici

V každém pístovém stroji působí dva druhy sil, a to síly od tlaku plynů ve válci a setrvačné síly vyvolané účinkem pohybujících se hmotností částí klikového mechanismu. Ke stanovení velikosti sil, které působí na ojnici je nejprve důležité vyjít ze základních veličin. V následujících výpočtech jsem určil velikost zrychlení pístu, úhlového zrychlení ojnice, úhlové rychlosti ojnice a velikost výkyvu ojnice. Tyto hodnoty jsem počítal v závislosti na úhlu pootočení klikového hřídele. Výpočet následujících hodnot jsem provedl pomocí programu MathCAD. Veškeré hodnoty budou počítány ke stanovenému souřadnému systému podle obr.6.11.

6.3.1 Výpočet základních veličin klikového mechanismu:

Pro výpočet dráhy, rychlosti a zrychlení jsem nejprve stanovil velikost úhlové rychlosti pro jmenovité otáčky klikového hřídele, klikového poměru a poloměru zalomení kliky.

Poloměr zalomení kliky:
$$r_k = \frac{Z}{2} \quad (6.1)$$

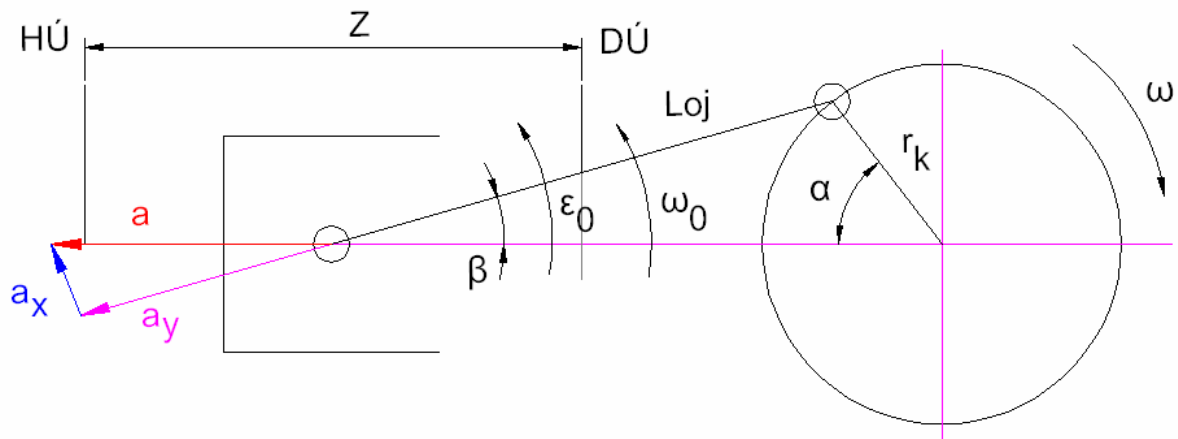
$$r_k = \frac{86}{2}$$
$$r_k = 43 \text{ mm}$$

Úhlová rychlost klikového hřídele:
$$\omega = 2 * \pi * n \quad (6.2)$$
$$\omega = 2 * \pi * 113,33$$
$$\omega = 712,09 \text{ rad.s}^{-1}$$

Ojniční poměr:
$$\lambda = \frac{r_k}{L_0} \quad (6.3)$$

$$\lambda = \frac{43}{143}$$

$$\lambda = 0,301$$

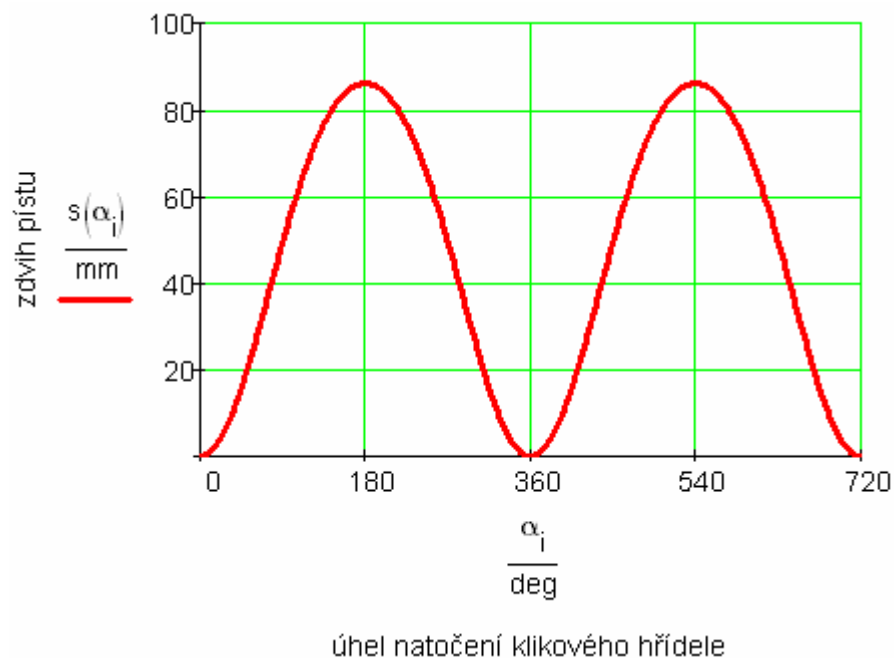


Obr.6.1 – Základní veličiny klikového mechanismu

6.3.1 Výpočet dráhy pístu

Dráha pístu v závislosti na $\alpha[\text{mm}]$:

$$s = r_k * \left[1 - \cos(\alpha) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos(2\alpha)) \right] \quad (6.4)$$

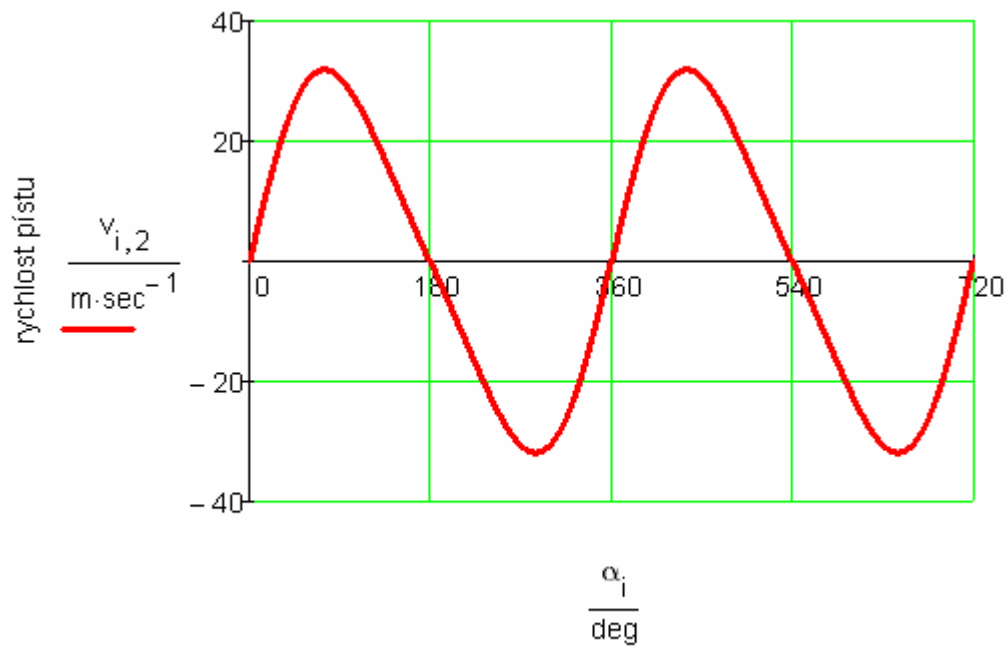


Obr.6.2 –Graf - Dráha pístu v závislosti na úhlu pootočení klikového hřídele

6.3.2 Výpočet rychlosti pístu

Rychlost pístu v závislosti na $\alpha[\text{m.s}^{-1}]$:

$$v = \omega * r_k * \left[\sin(\alpha) + \frac{\lambda}{2} * \sin(2\alpha) \right] \quad (6.5)$$



úhel natočení klikového hřídele

Obr.6.3 – Graf - Rychlost pístu v závislosti na úhlu pootočení klikového hřídele

6.3.3 Výpočet zrychlení

Zrychlení pístu v závislosti na α [$m \cdot s^{-2}$]:

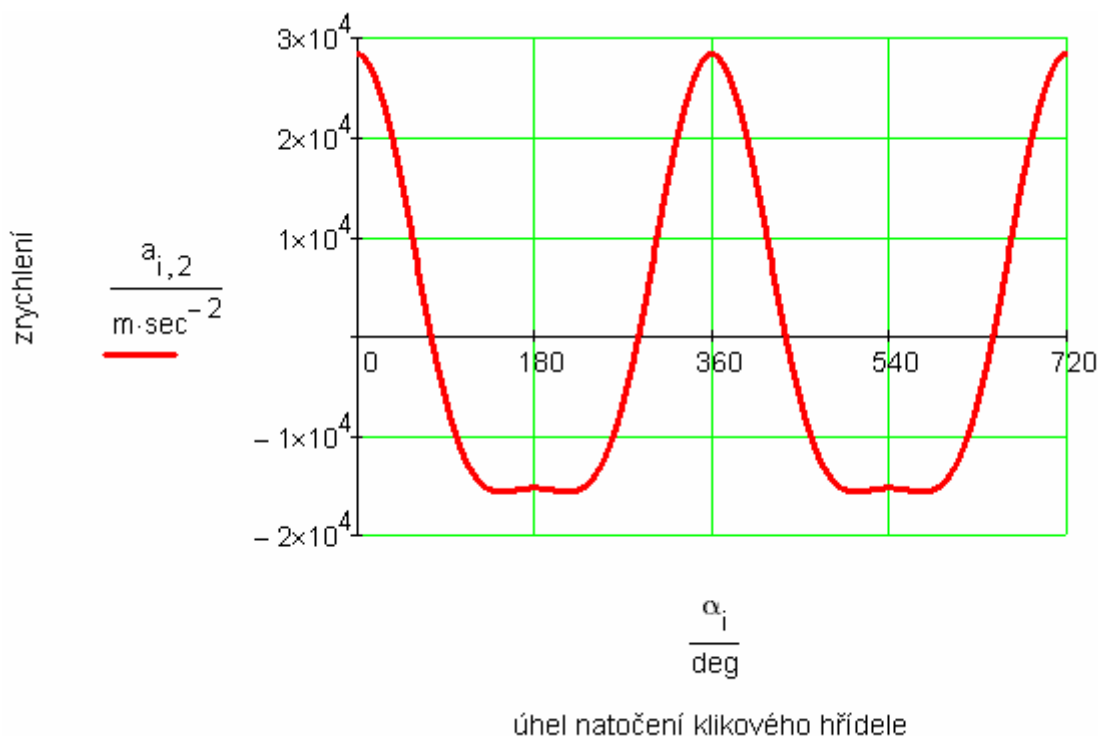
$$a = r_K \cdot \omega^2 \cdot [\cos(\alpha) + \lambda \cdot \cos(2\alpha)] \quad (6.6)$$

$$a_x = a \cdot \sin(\beta) \quad (6.7)$$

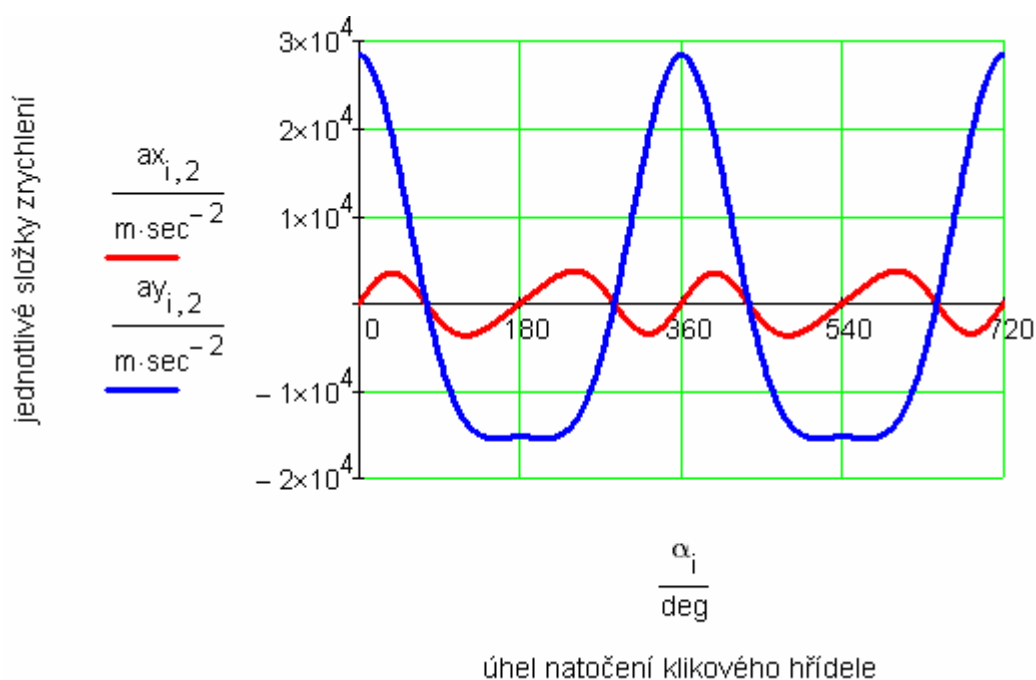
$$a_y = a \cdot \cos(\beta) \quad (6.8)$$

Velikost složky zrychlení v tomto případě pouze počítána ve směru působení síly od tlaku plynů na dno pístu, tj. je ve směru pohybu pístu od horní do dolní úvratí. Tam bude hodnota zrychlení dle grafu největší. Zrychlení pístu je jedna z hodnot, kterou budeme zadávat do programu ANSYS. Je to jeden ze dvou způsobů. Tento způsob je složitější v tom, že při zadávání tohoto zrychlení bychom museli při různých natočeních klikového hřídele α neustále měnit úhel výkyvu ojnice β . Tento způsob je správný, ale zdoluhavý. Proto jsem zvolil jednodušší způsob a to ten, že zrychlení pístní skupiny **a** jsem rozložil do 2.směrů na složky **a_x**, **a_y**. (Viz.**obr.6.1**)

Z grafu na **obr.6.4** je zřejmé, že důležitou hodnotou, kterou budeme zadávat do programu ANSYS bude hodnota zrychlení ve směru osy válce.



Obr.6.4 – Graf – Zrychlení pístu v závislosti na úhlu pootočení klikového hřídele



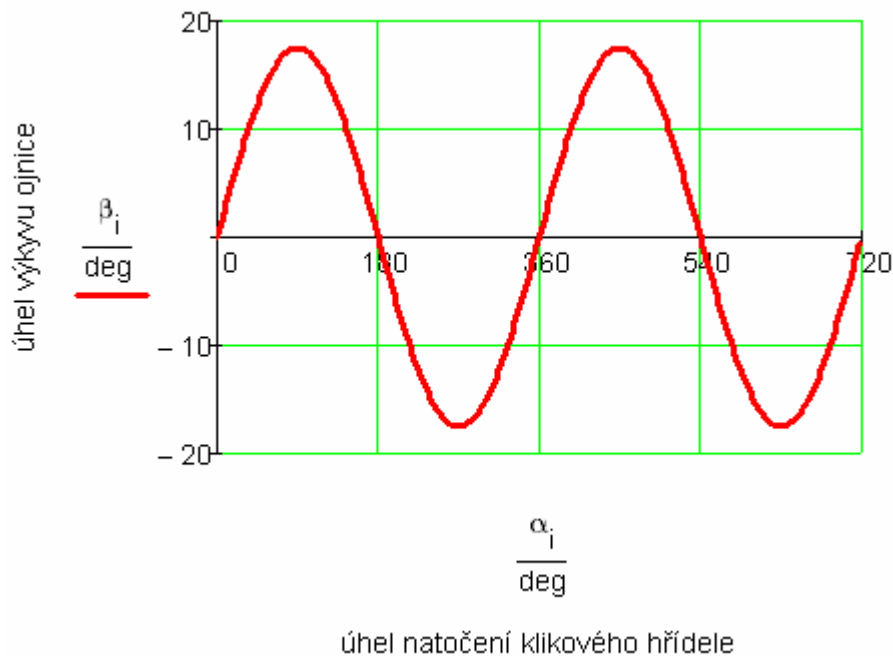
Obr.6.5 – Graf – Složky zrychlení v závislosti na úhlu pootočení klikového hřídele

6.3.4 Výpočet úhlové rychlosti, zrychlení a úhlu výkyvu ojnice

Tyto veličiny jsou také důležité, protože ojnice koná složitý pohyb a je třeba určit průběhy těchto veličin pro výkyvný pohyb ojnice kolem ojničního čepu. Průběhy jednotlivých veličin budeme určovat pro úhel pootočení klikového hřídele v intervalu 0° až 720° . Z grafu 6.5 je patrné, že největších hodnot úhlové rychlosti bylo dosaženo v horní a dolní úvrati pístu.

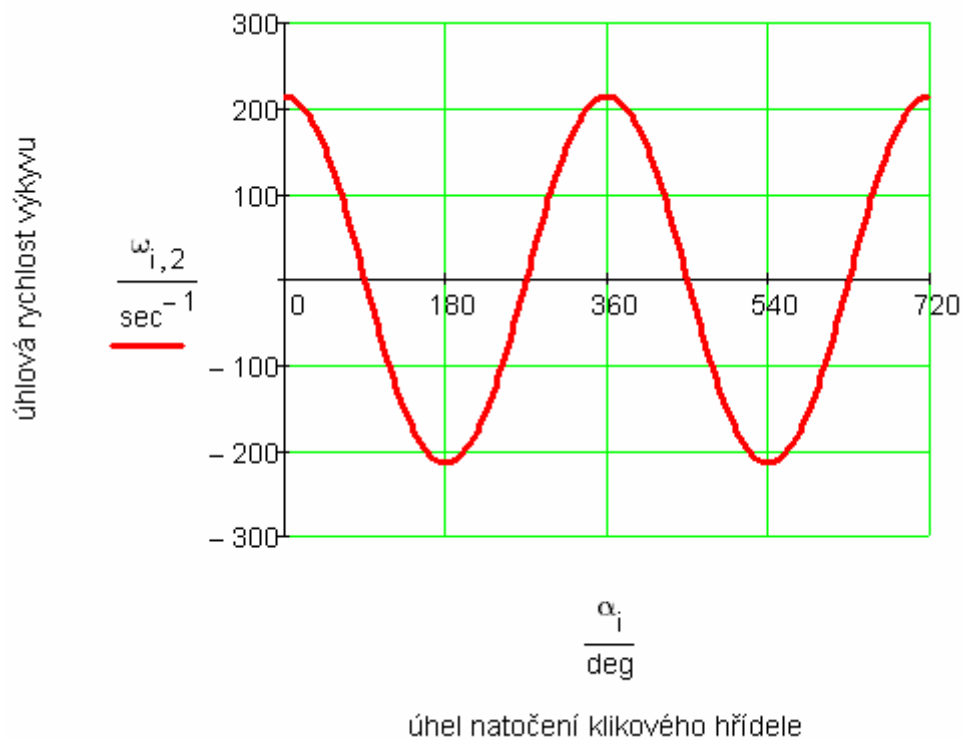
Největšího úhlového zrychlení bylo dosaženo při úhlu natočení klikového hřídele $\alpha = 90^\circ$. Přesněji vyjádřeno v polovině zdvihu pístu.

Úhel pootočení ojnice od osy válce $\beta [^\circ]$: $\beta(\alpha) = a * \sin(\lambda * \sin(\alpha))$ (6.9)



Obr.6.6 – Graf - Závislost úhlu výkyvu ojnice na úhlu pootočení klikového hřídele

Úhlová rychlost výkyvu ojnice $[\text{rad.s}^{-1}]$: $\omega_o(\alpha) = \lambda * \omega * \cos(\alpha)$ (6.10)

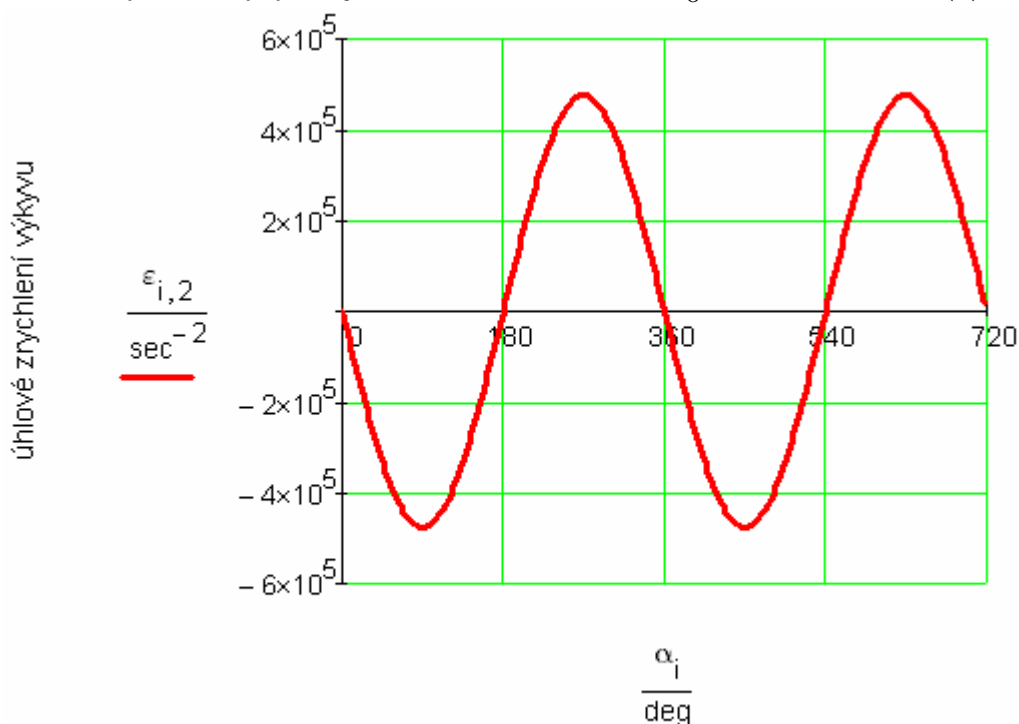


Obr.6.7 – Graf - Závislost úhlové rychlosti výkyvu ojnice na úhlu pootočení klikového hřídele

Úhlové zrychlení výkyvu ojnice [rad.s⁻²]:

$$\varepsilon_o(\alpha) = -\lambda * \omega^2 * \sin(\alpha)$$

(6.11)

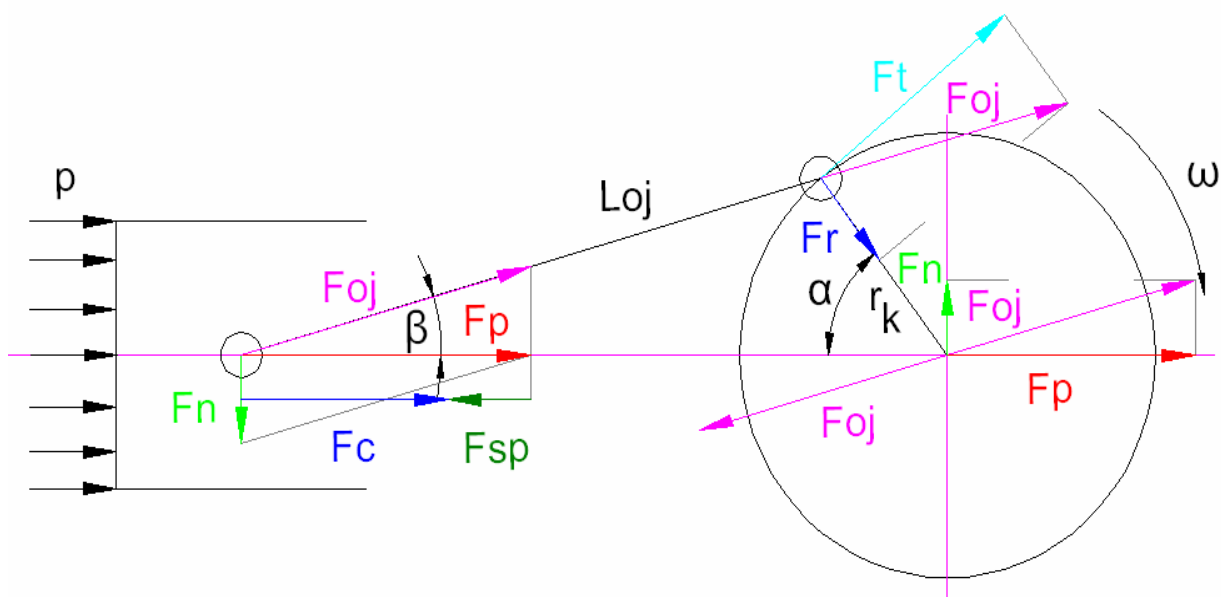


úhlové natočení klikového hřídele

Obr.6.8 – Graf - Závislost úhlového zrychlení výkyvu ojnice na úhlu pootočení klikového hřídele

6.3.5 Výpočet sil v klikovém mechanismu

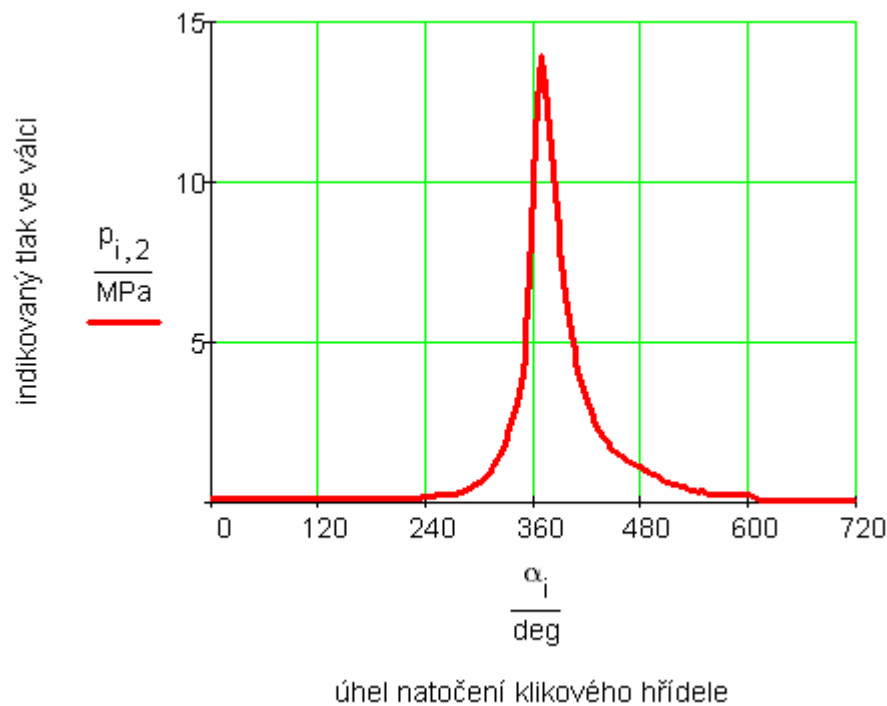
Na následujícím obrázku jsou naznačeny všechny síly působící na klikový mechanismus. Jednak to jsou síly od tlaků plynů a síly setrvačné od pístní skupiny a dále to jsou to síly radiální a tangenciální, které jsou přenášeny z ojnice na klikovou hřídel. Pro naše výpočty v ANSYSU budou důležité zejména hodnoty sil od tlaku plynů F_p .



Obr.6.9 –Graf - Rozložení sil v klikovém mechanismu

Síly od tlaku plynů, které budou zadávány do programu ANSYS budou zmenšeny o setrvačné síly pístní skupiny. Hmotnost pístní skupiny je součtem hmotností pístu, pístního čepu, pístních kroužků a pojistného kroužku pro pístní čep. Tato hodnota byla zjištěna z katalogu pro příslušný píst. Pro zjištění velikosti sil od tlaku plynů je důležité znát indikované tlaky ve válci motoru při příslušném úhlu natočení klikového hřídele tzv. p-alfa diagram (**obr.6.10**). Tyto hodnoty byly experimentálně odměřeny na příslušném motoru a po té převzány.

Indikátorový diagram:



Obr.6.10 –Graf - Indikátorový diagram

Objem v závislosti na úhlu natočení klikového hřídele [α]:

Plocha pístu:

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (6.12)$$

$$S = \frac{\pi \cdot 8,6^2}{4}$$

$$S = 58,088 \quad [\text{cm}^2]$$

Objem spalovacího prostoru:

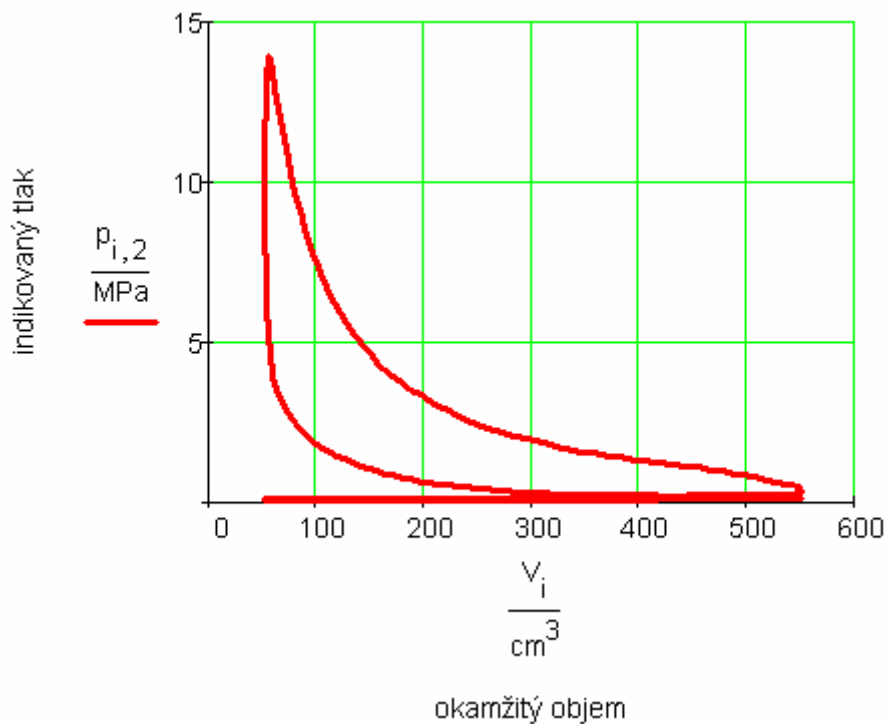
$$V_K = \frac{V_z}{\epsilon_K - 1} \quad (6.13)$$

$$V_K = \frac{499,577}{10,5 - 1}$$

$$V_K = 52,585 \quad [\text{cm}^3]$$

$$\text{Okamžitý objem nad pístem v závislosti na } \alpha: V_i = S \cdot s + V_K \quad (6.14)$$

Na obrázku **6.11** je znázorněn příslušný **p – V** diagram. Jedná o vyobrazení indikovaného tlaku v závislosti na okamžitém objemu spalovacího prostoru, který určuje poloha pístu.



Obr.6.11 –Graf - Průběh indikovaného tlaku ve válci

Síla od tlaku plynů v závislosti na α :

Hmotnost pístní skupiny: $m_p = 0,451$ [kg]

Redukovaná hmotnost posuvných částí ojnice: $m_1 = 0,177$ [kg]

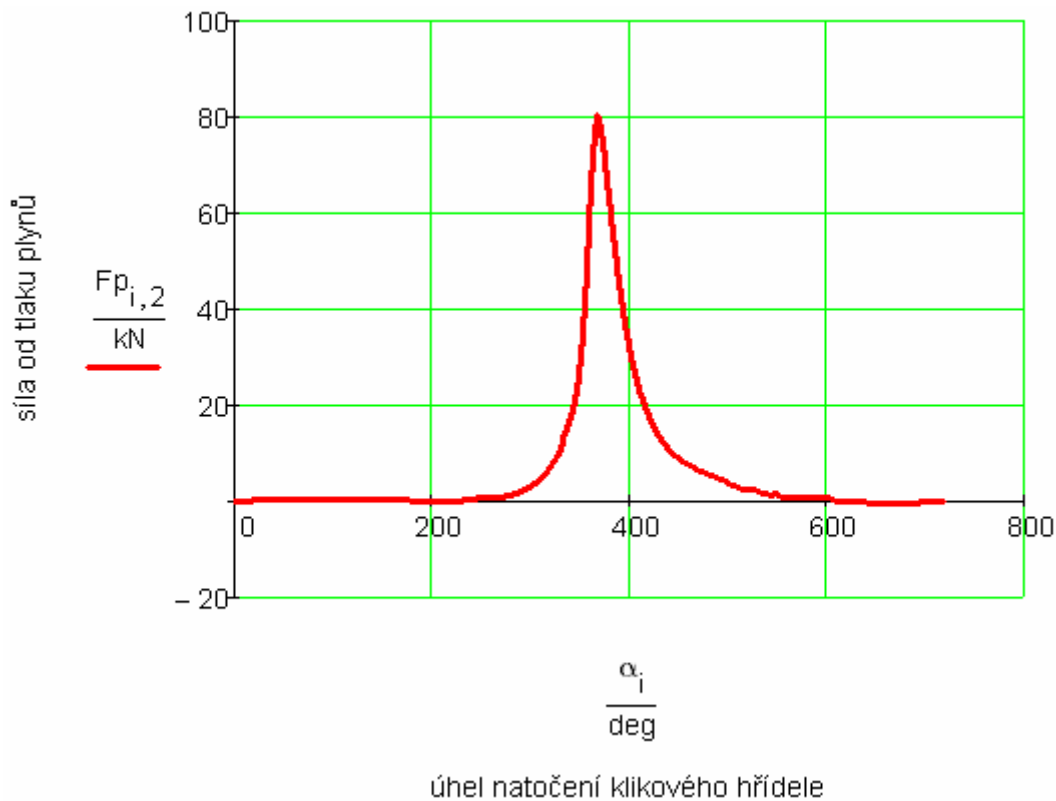
Redukovaná hmotnost rotačních částí ojnice: $m_2 = 0,433$ [kg]

Důležitou hodnotou z hlediska zadání do programu ANSYS jak bylo již řečeno bude celková hodnota sil působící na ojnici. Tuto hodnotu vypočteme odečtením setrvačných sil pístní skupiny od síly vyvolané tlakem plynů. Hodnoty celkových sil od tlaku plynů jsou znázorněny na **obr.6.14**.

$$F_p = S \cdot (p_i - p_a) \quad (6.15)$$

Maximální síla od síly od tlaku plynů odečtená z grafu (viz. obr. 6.8)

$$\text{Max}(F_p) = 80,250 \text{ kN}$$



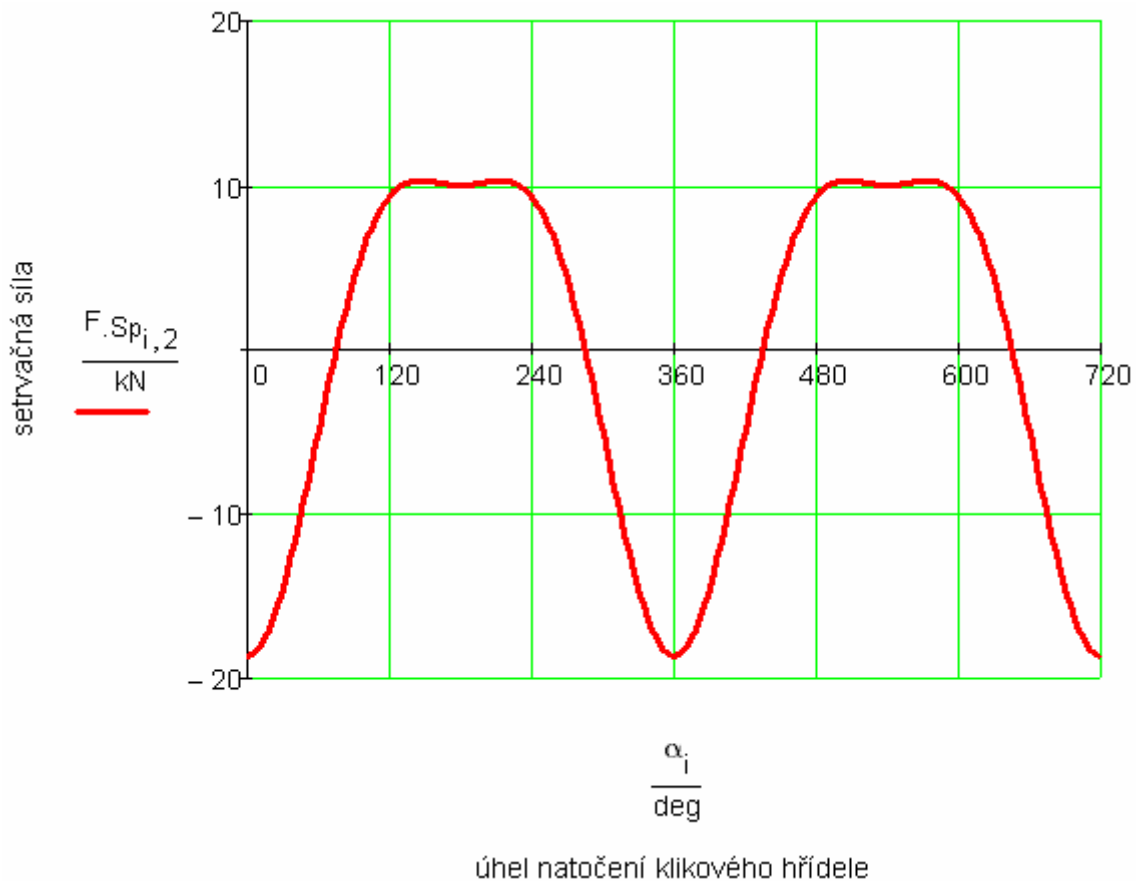
Obr. 6.12 – Graf - Průběh sil od tlaku plynů

Setrvačná síla pístní skupiny v závislosti na α :

$$F_{sp} = -(m_p + m_l) \cdot a \quad (6.16)$$

Maximální hodnota setrvačné síly odečtená z grafu (viz. obr. 6.9):

$$\text{Max}(F_{sp}) = 10,263 \text{ kN}$$



Obr.6.13 – Graf - Závislost setrvačné síly na úhlu natočení klikového hřídele

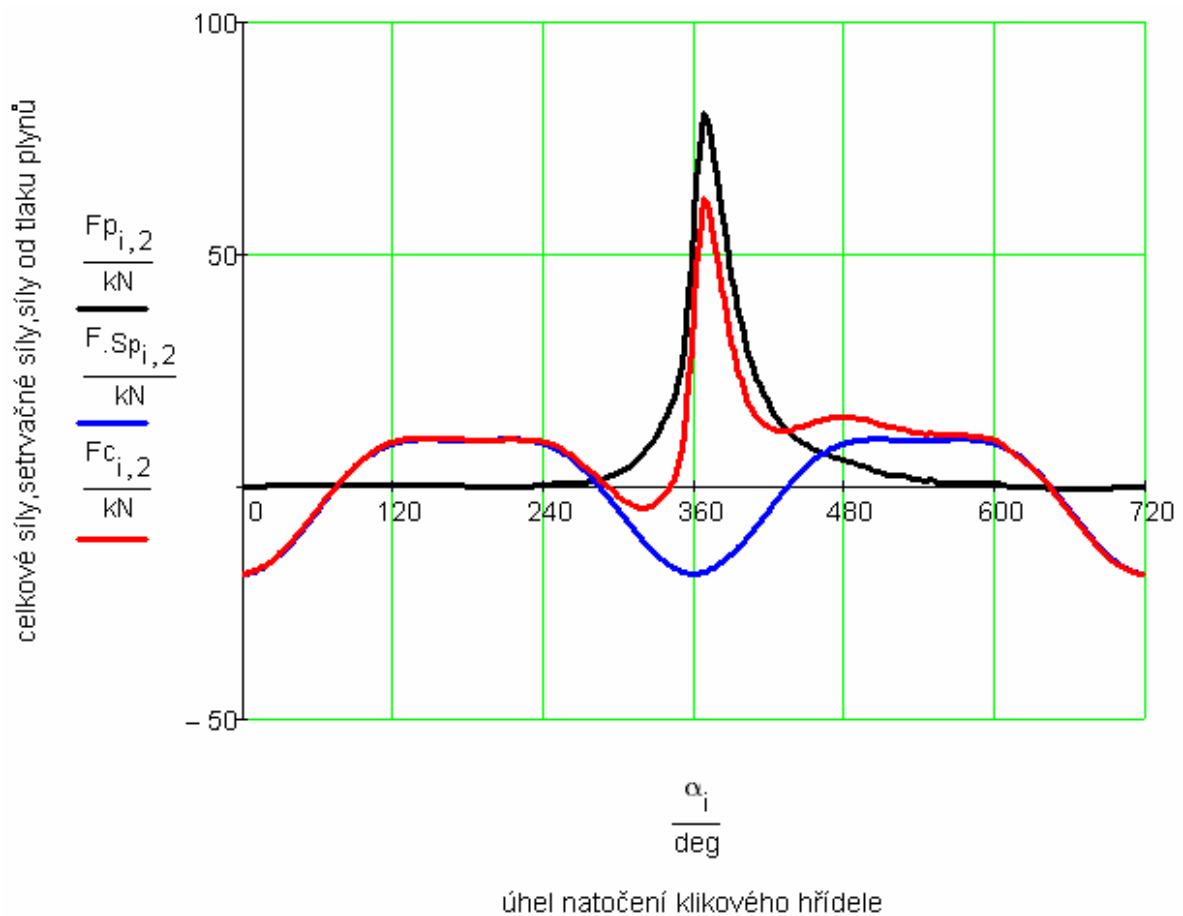
Celková síla v závislosti na α :

Hodnota celkové síly působící na ojnici se určí pomocí vztahu (6.16). Hodnota této síly bude důležitá pro následující výpočet síly působící ve směru dřívku ojnice. Velikost maximální je celkové síly je menší než maximální velikost síly od tlaku, což je správné.

$$F_C = F_p + F_{Sp} \quad (6.17)$$

Maximální hodnota celkové síly odečtená z grafu (viz. obr.6.10)

$$\text{Max } (F_C) = 61,928 \text{ kN}$$



Obr.6.14 –Graf - Závislost sil působících na ojnici na úhlu natočení klikového hřídele

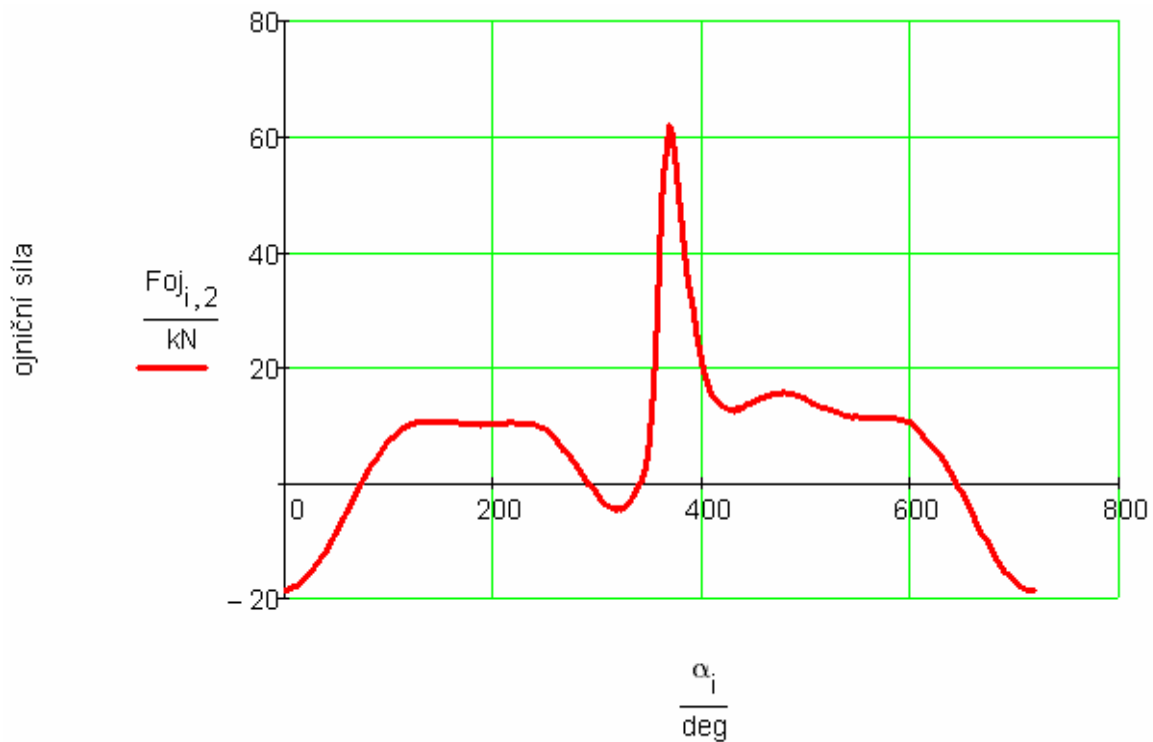
Celková síla působící na horní oko ve směru dříku:

Hodnota celkové síly působící na horní oko ojnice je pro nás důležitá hodnota z hlediska zadání do programu ANSYS. Protože počítat z celkovou silou, kterou jsme určili v předchozím výpočtu by bylo nevýhodné, protože by se ojnice musela pro jednotlivé stavy natáčet. Velikost síly se určí výpočtem dle vztahu (6.17). Graficky se jedná o rozložení celkové síly na normálovou sílu a sílu působící ve směru dříku ojnice. Pozn. Ve skutečnosti tato síla působí ve směru dříku směrem od horní do dolní úvrati, ale vzhledem k orientaci souřadného systému v programu ANSYS bude působit ve směru opačném. Vše je vysvětleno v kapitole 6.6, kde je síla zadávána.

$$F_{Oj}(\alpha) = \frac{F_c}{\cos(\beta)} \quad (6.18)$$

Maximální hodnota celkové síly působící ve směru dříku ojnice odečtená z grafu 6.10

$$\max(F_{Oj}) = 61,982 \text{ kN}$$



úhel natočení klikového hřídele

Obr.6.15 – Graf - Závislost ojniční síly na úhlu natočení klikového hřídele

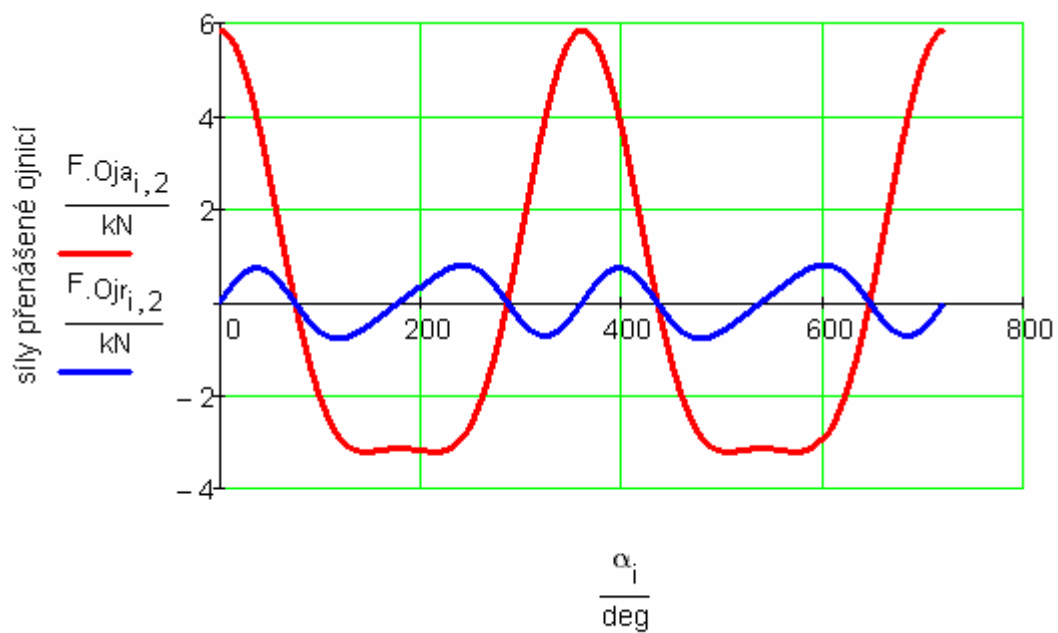
Síly přenášené ojnicí:

Axiální síla od ojnice:

$$F_{ojA}(\alpha) = m_1 \cdot a \quad (6.19)$$

Radiální síla od ojnice:

$$F_{ojr}(\alpha) = \tan(\beta) \cdot F_{oja} \quad (6.20)$$



úhel natočení klikového hřídele

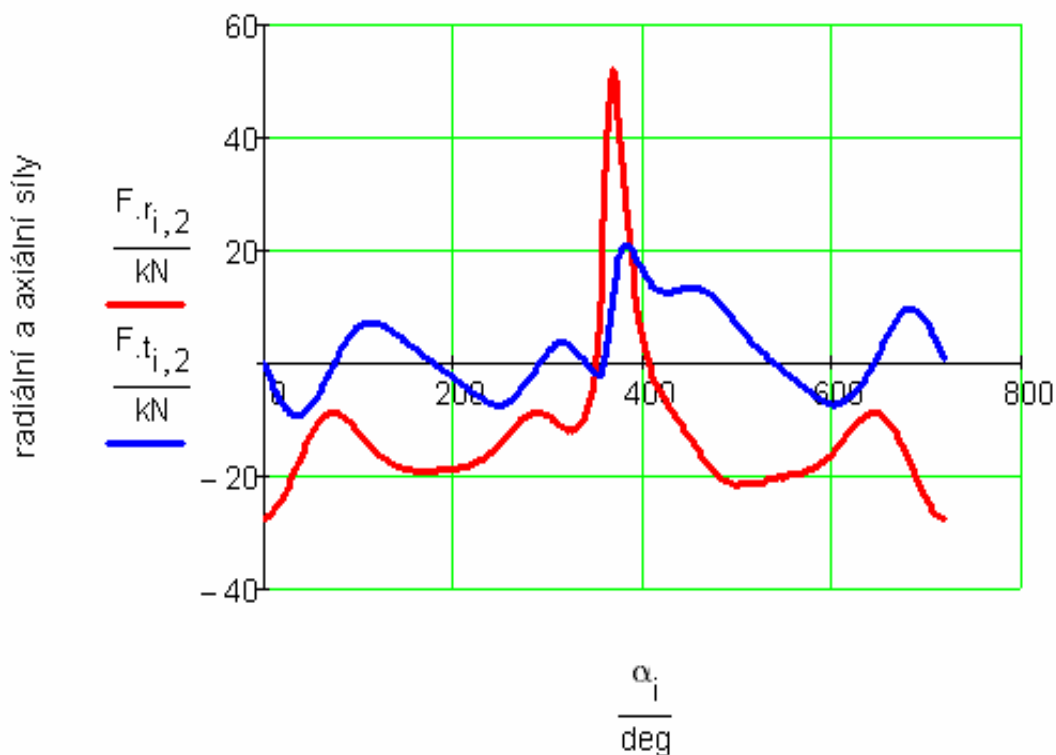
Obr.6.16 – Graf - Radiální a axiální síly přenášené ojnicí

Radiální a tangenciální síly působící na ojnicí čep:

Odstředivá síla redukována rotačních částí: $F_{OD}(\alpha) = m_2 \cdot r_K \cdot \omega^2$ (6.21)

Radiální síla: $F_r(\alpha) = F_{Oj} \cdot \cos(\alpha + \beta) - F_{OD}$ (6.22)

Tangenciální síla: $F_T(\alpha) = F_{Oj} \cdot \sin(\alpha + \beta)$ (6.23)

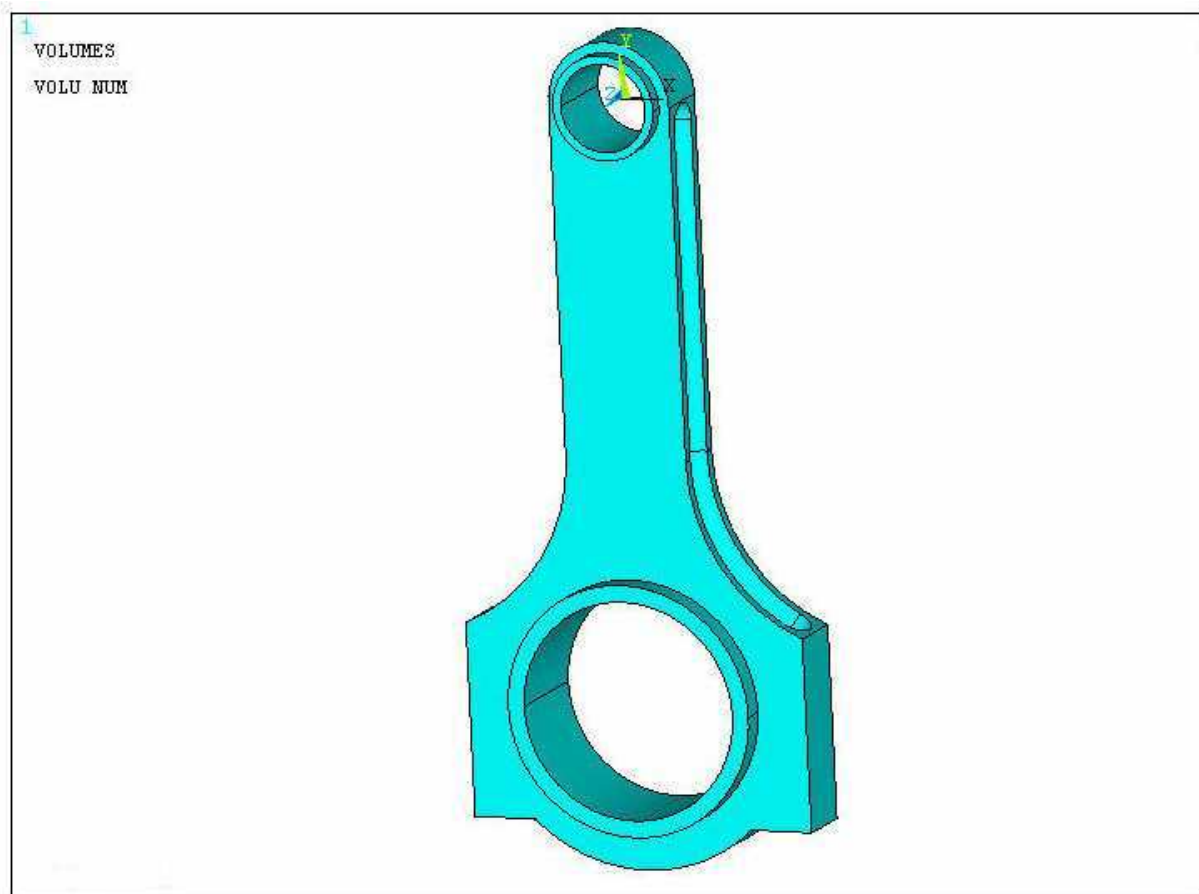


úhel natočení klikového hřídele

Obr.6.17 – Graf - Radiální a axiální síly působící na ojnicí čep

6.4. Import modelu z CAD do ANSYSU

Převedení CAD modelu do programu ANSYS je podrobně popsáno v kapitole 6.3. Na obr.6.18 je importovaný model ojnice s počátkem souřadného systému v oku pro pístní čep.



Obr.6.18 – Model ojnice v ANSYSU

6.5. Postup při vysíťování ojnice

Abychom vytvořil kompletní síť celé ojnice je třeba zvolit druhy elementů, materiálových vlastností, reálných konstant. Všechny tyto hodnoty jsou popsány v následujících kapitolách.

6.5.1 Volba druhů elementů

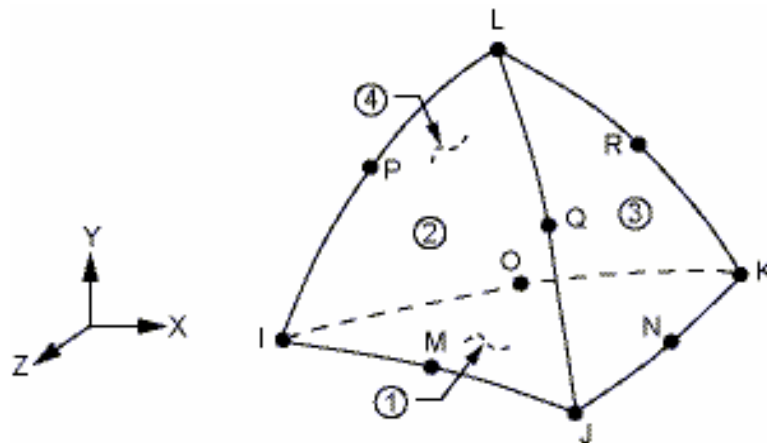
Pro vytvoření sítě byly zvoleny tyto elementy:

SOLID 187
LINK 10
SHELL 63
SOLID 92
MESH 200

SOLID 187

- jedná se o prvek 3D kvadratického typu

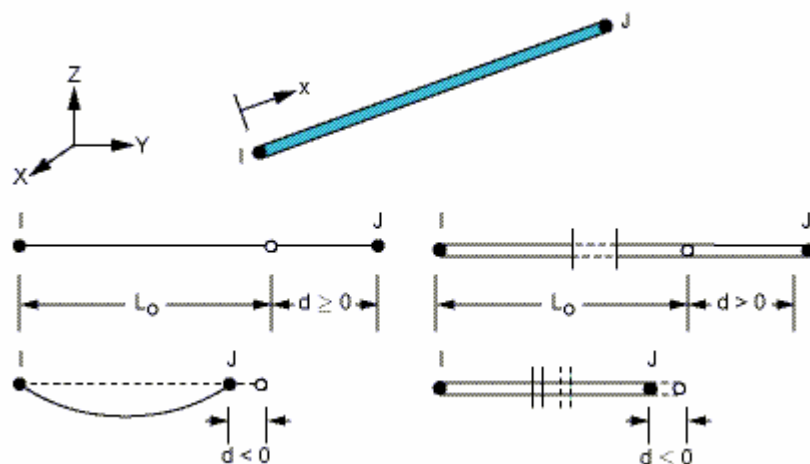
- je charakterizován jako 10- uzlový prvek, který má uzel v každém vrcholu a v polovině každé spojnice mezi vrcholy.
- každý uzel je charakterizován 3.stupni volnosti
- volbou tohoto druhu elementu je možno použít při tvorbě sítě volného síťování (volba FREE MESH)



Obr.6.19 – Prvek SOLID 187

LINK 10:

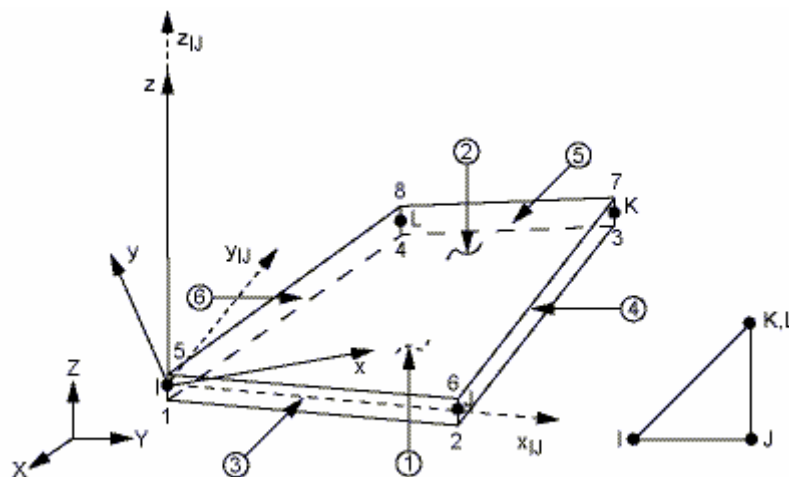
- jedná se o 3D prutový prvek
- má takové vlastnosti, že umožňuje pouze jednoosé zatížení (tlakové, tahové)
- skládá se pouze ze 2.uzlů (viz.obr.6.20) umístěných na obou koncích prutu
- každý z těchto uzlů má 3.stupně volnosti
- tento prvek byl použit jako prutová náhrada pro pístní a ojnicí čep
- při volbě tohoto prvku nesmíme zapomenout na volbu jen pro tlakové zatížení v ELEMENT TYPE
- v reálných konstantách musí být zadána důležité hodnoty průřezů pístního a ojnicího oka



Obr.6.20 – Prvek LINK 10 – tahové a tlakové zatížení

SHELL63:

- jedná se o prvek s elastickými vlastnostmi
- je charakterizován 4.uzly, 4.tloušťkami, elastickou maticí tuhosti
- 6. stupňů volnosti v každém uzlu
- posuvy v x,y,z a rotace kolem os x,y,z
- izotropní materiálové vlastnosti
- velké deformační schopnosti

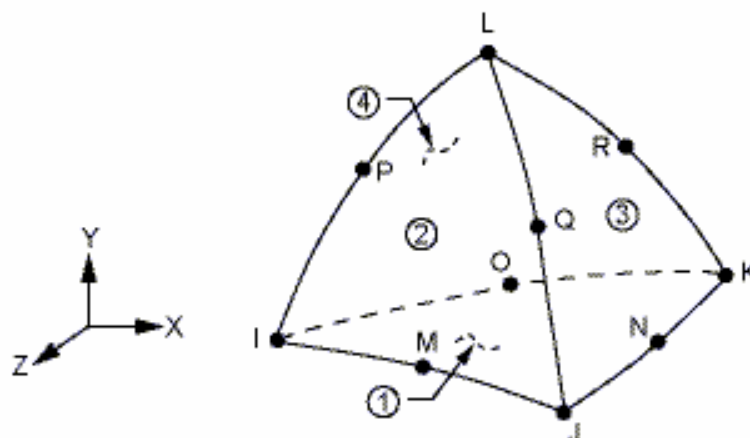


Obr.6.21 – Prvek SHELL 63

SOLID 92:

- jedná se o kvadratický prvek
- je vhodný zejména pro aplikace i pro modely nepravidelné mřížky (např. vyrobené v různých CAM/CAD systémech)
- tento element je definován 10 – ti uzly
- má 3.stupně volnosti v každém uzlu
- posuvy v uzlových x,y a z směrech
- má plastické, deformační a napětové schopnosti

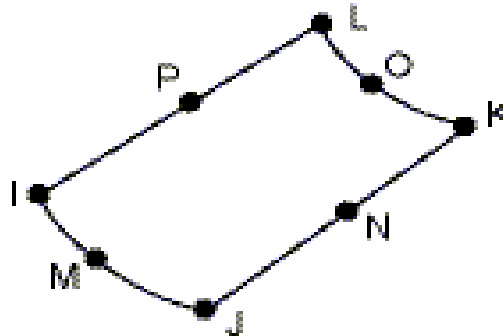
Vzhledem k tomu, že analyzovaná ojnice není tvarově složitá, tak jsem tento prvek použil k vysíťování objemu ojnice.



Obr.6.22 – prvek Solid 92

MESH 200

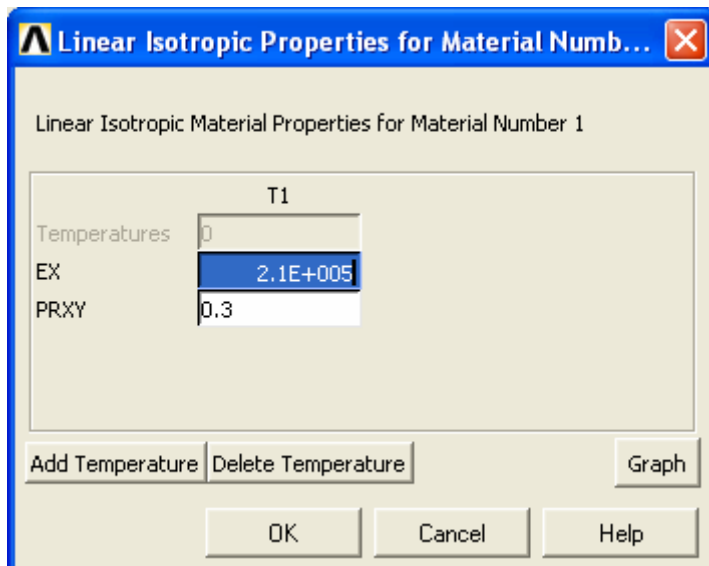
- jedná se o čtyřboký prvek který se skládá z 8.uzlů
- v Ansysu může být tento prvek spojen s jakýmkoliv jiným prvkem a poté může být ponechán a nebo vymazán, neboť nemá vliv na výsledné řešení
- tento prvek jsem použil pouze při rozdělení horního a dolního oka a vysíťování obou ok a vytvoření prutových náhrad.



Obr.6.23 – prvek MESH 200

6.5.2 Volba materiálových vlastností:

V MENU materiálových vlastností nastavíme lineární – elastické a izotropní vlastnosti materiálu. Na následujícím obrázku je zobrazeno MENU pro zadání modulu pružnosti materiálu a poissonovy konstanty:



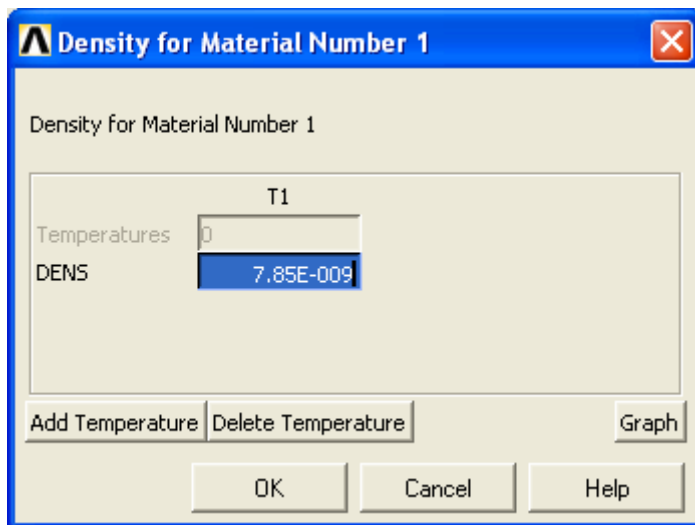
Modul pružnosti v tahu (tlaku):

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \quad [\text{MPa}]$$

Poissonova konstanta:

$$\mu = 0,3$$

Obr.6.24 – Zadávání materiálových konstant do ANSYSU



Hustota materiálu:

$$\rho = 7850 \cdot 10^{-9} \quad [\text{t} / \text{mm}^3]$$

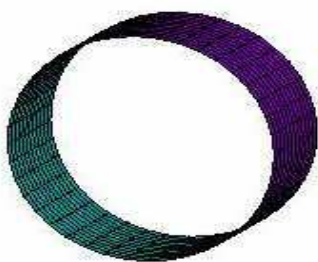
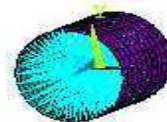
Obr.6.25 – Zadávání hustoty do ANSYSU

6.5.3 Vytvoření prutových náhrad pístního a ojničního čepu

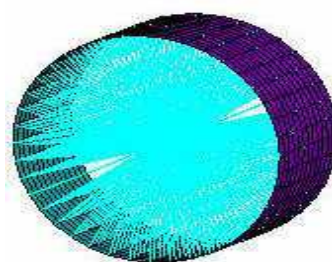
Ještě než jsem vytvořil prutové náhrady ok pro pístní a ojniční čep musíme obě oka rozdělit a potom vysíťovat. Rozdělení obou ok jsem provedl pomocí prvku MESH 200. Ten umožní jejich pravidelné rozdělení. Rozdělení jsem provedl pomocí menu MESHING, kde jsem vybral dělení čar, které tvoří obě oka.

Horní oko bylo rozděleno po obvodu na 30 dílů a v ose oka na 10 dílů

Dolní oko bylo rozděleno po obvodu na 40 dílů a v ose oka na 12 dílů.



Obr.6.26 – Vysíťovaná oka



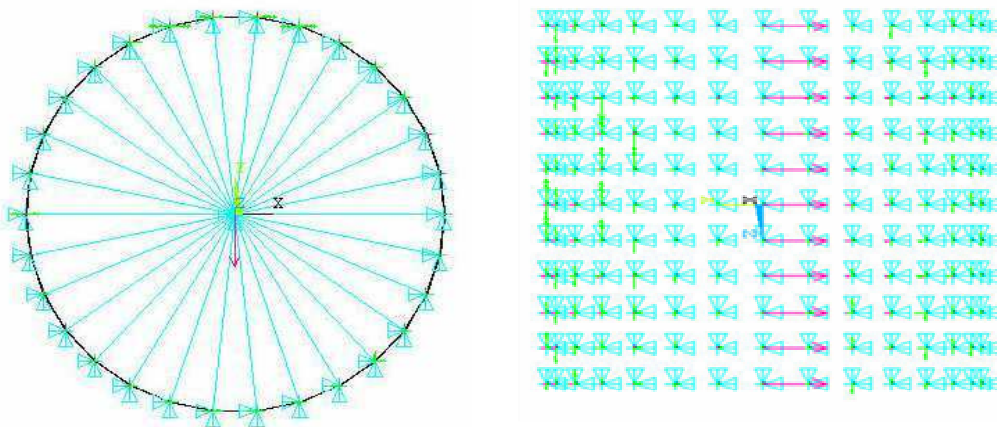
Obr.6.27 – Tvorba prutových náhrad

Po rozdělení obou ok pomocí prvku MESH 200 můžeme přejít k vytvoření prutových náhrad. Tvorba prutových náhrad jsem provedl natažením prvků LINK 10. K vytvoření prutů může být provedeno dvěma způsoby. Prvním způsobem je postupné natahování jednotlivých prutů do uzlů ležících v ose ok. Tento způsob jsem v tomto případě ale nepoužil, protože je velice složitý a zdoluhavý. K tvorbě prutů jsem použil již vytvořeného makra. Ještě než ale spustíme makro je velice důležitou věcí vyselektování uzlů, které připadají jednotlivých plochám horního a dolního oka. Nejprve jsem si vyselekoval uzly dolního oka a poté spustil makro s nastavenými atributy. To samé jsem provedl i u horního oka. Vysíťovaná oka s prutovými náhradami jsou zobrazena na **obr.6.27**.

6.5.4 Zadání průřezů prutů horního a dolního oka

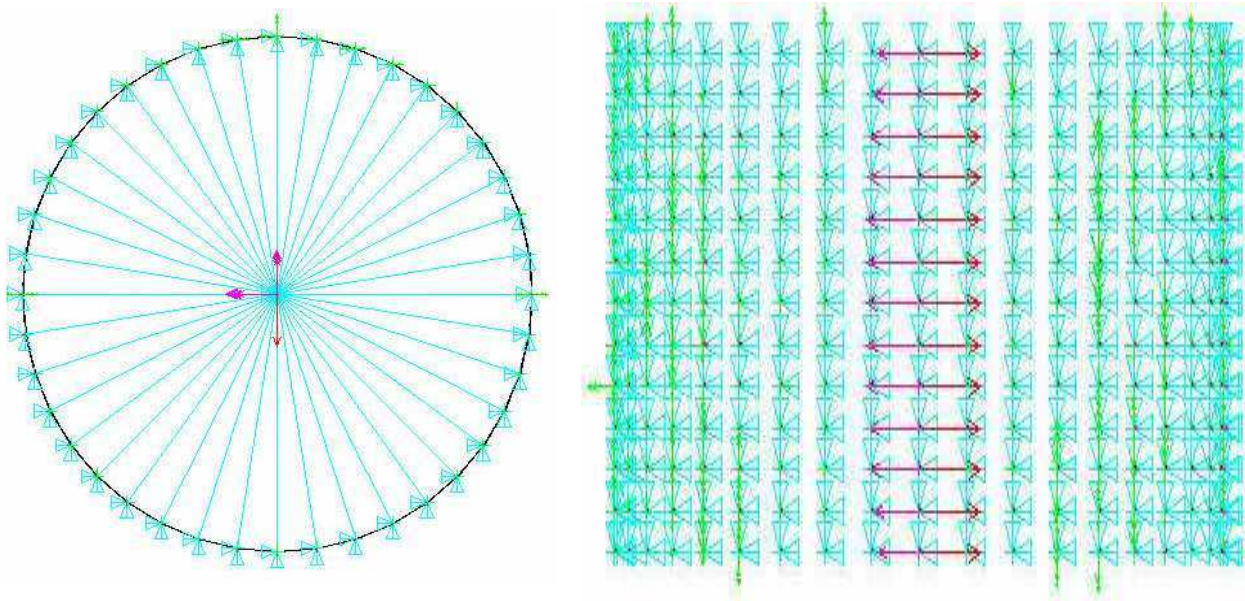
Jak již bylo řečeno v kapitole 6.5, tak dalšími důležitými hodnotami zadávanými do programu ANSYS jsou reálné konstanty elementu LINK 10, které charakterizují průřezy prutů horní a dolního oka. Určování hodnot reálných konstant bylo provedeno pomocí principu vymezení olejové vrstvy. Výpočty bylo stanoveno, že maximální síla, která působí na horní oko ojnice ve směru dráčky ojnice dosahuje velikosti 62 kN. Z hlediska výpočtu budeme počítat ze silou 65 kN, hlavně z důvodu bezpečnosti. Uzlům, které tvoří středy prutových náhrad je povolen posuv pouze ve směru působení síly a uzlům, které tvoří vnitřní plochy obou ok je zamezen posuv do všech směrů. Potom je velikost síly v horním oku rozdělena do 11 uzlů (viz. kapitola 6.5.3), v dolním oku je rozdělena do 13 uzlů. Touto silou je zatlačeno do středu prutových náhrad obou ok a sleduje se velikost posuvu, který jen charakterizován reálnou konstantou. Je nutné tyto reálné konstanty upravovat tak dlouho dokud není velikost posuvu menší než tloušťka olejové vrstvy jak v horním tak dolním oku ojnice.

V horním oku ojnice jsem uvažoval s tloušťkou olejové vrstvy 0,04 mm a v dolním oku asi 0,06 mm.



Obr.6.28 – Posuv v horním oku

Průřez prutu v horním oku: $S_H = 1,85$ [mm²]

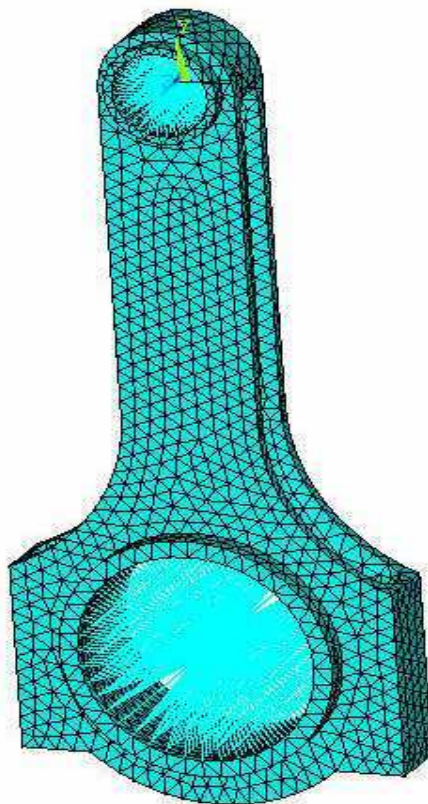


Obr.6.29 – Posuv v dolním oku

Průřez prutu v dolním oku: $S_D = 1,54$ [mm²]

6.5.5 Síťování objemu ojnice

Nyní již následuje síťování samotného objemu ojnice. Pro vysíťování jsem zvolil prvek SOLID 92. Tento prvek jsem zvolil z důvodu, že ojnice není příliš tvarově složitá, takže jsem použil volného síťování (FREE MESH).



Obr.6.30 – Kompletně vysíťovaný objem ojnice

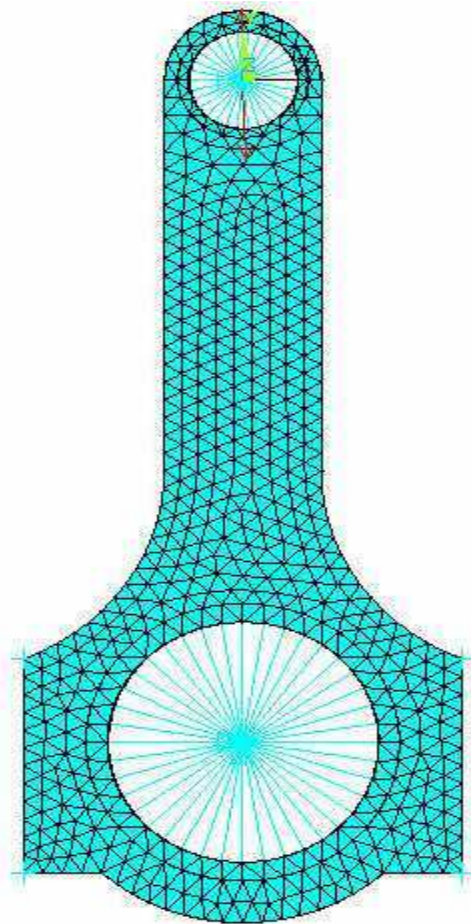
6.6. Zavazbení ojnice a zadání okrajových podmínek

Po vytvoření prutových náhrad již následuje zavazbení ojnice. Ojnice byla samozřejmě zavazena ve středech prutových náhrad horního a dolního oka. Síly, které na ojnici budou působit byly zadány do středu prutové náhrady horního oka. Středům uzlů prutových náhrad horního oka byly zamezeny posuvy do směrů **x** a **z**. Byl povolen pouze posuv ve směru osy **y** tedy ve směru působící síly. Uzlům tvořícím střed dolního oka byl zamezen posuv posuv ve všech směrech tzn. **x, y, z**. Nakonec jsem si vytvořil 4 uzly na povrchu ojnice, aby nedošlo k posuvu ojnice do směru **z**. Všechny hodnoty, které budu zadávat do programu ANSYS jsem vypočítal v software MATHCAD 14. Hodnoty jsou vypočítané pro 0° až 720° po 2° úhlu natočení klikového hřídele. Získané hodnoty jsou v příloze. Hodnoty zrychlení mají v příloze jednotky $[\text{m.s}^{-2}]$, ale do programu ANSYS je nutno tyto hodnoty zadávat v jednotkách $[\text{mm.s}^{-2}]$.

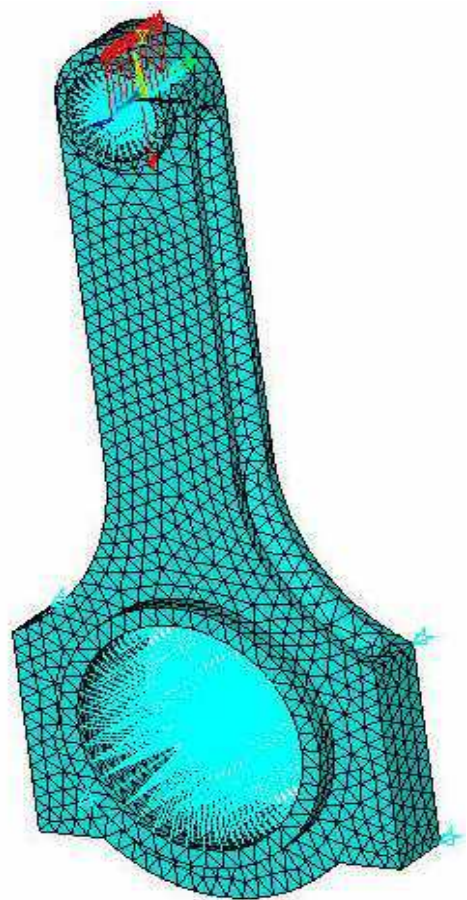
Hodnoty zadávané do programu ANSYS:

| | | |
|--|--------------------------|-----------------------|
| zrychlení pístu působící na ojnici ve směru x: | $\mathbf{a_x}$ | $[\text{m.s}^{-2}]$ |
| zrychlení pístu působící na ojnici ve směru y: | $\mathbf{a_y}$ | $[\text{m.s}^{-2}]$ |
| celková síla působící ve směru dřívku ojnice: | $\mathbf{F_{oj}}$ | $[\text{N}]$ |
| úhlové zrychlení výkyvu ojnice kolem osy z: | $\mathbf{\varepsilon_0}$ | $[\text{rad.s}^{-2}]$ |
| úhlová rychlost výkyvu ojnice kolem osy z: | $\mathbf{\omega_0}$ | $[\text{rad.s}^{-2}]$ |

Důležitou věcí při zadávání ojnicí síly do ANSYSU bylo její rozdělení do 11 uzlů. Velikost této síly byla proto 11x zmešena. Zavazbení a okrajové podmínky jsou na obr. 6.31 a 6.32.



Obr.6.31 – Zavazbená ojnice



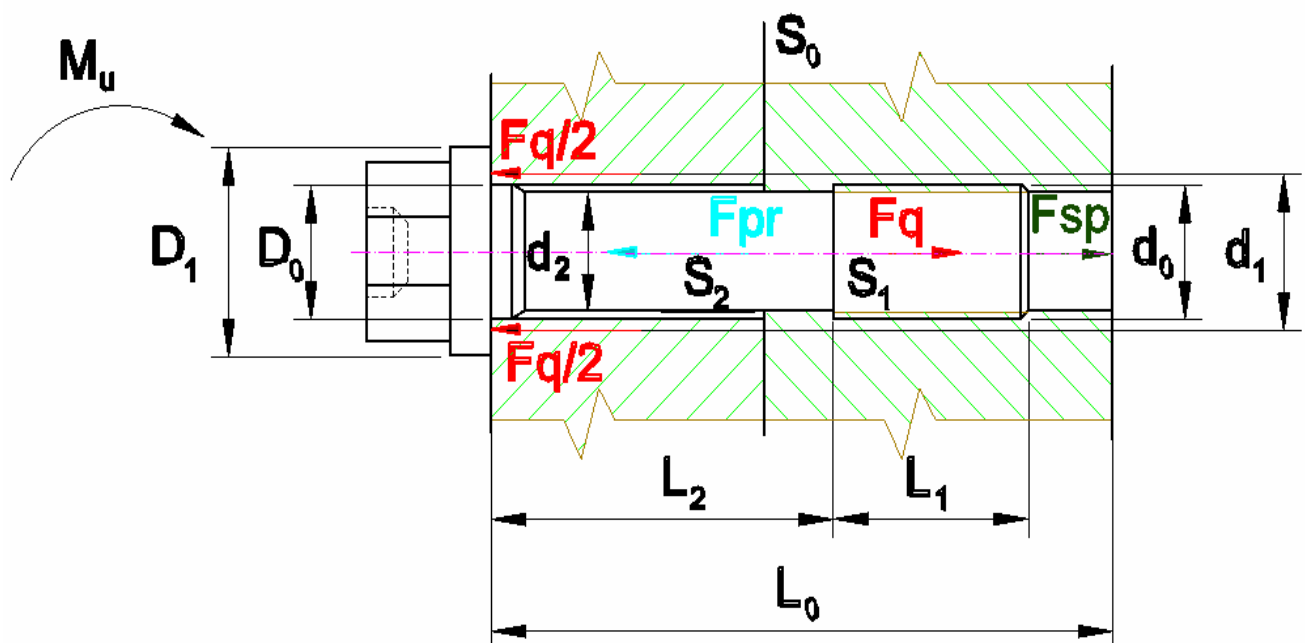
Obr.6.32 – Ojnice před výpočtem

Maximální síly ve směru dříku ojnice působí v kladném směru osy y a zrychlení pístní skupiny působící na ojnici působí směrem dolů viz. obr. 6.9.

6.7. Pevnostní kontrola ojničních šroubů

Pevnostní kontrola byla provedena dle. Kromě statické síly vyvolané od předpětí působí za provozu na ojniční šrouby síly od posuvných a rotačních hmot od pístní skupiny a ojnice. V horní úvratí pístu mezi sacím a výfukovým zdvihem je dosaženo maximálního zatížení ojničních šroubů. Podmínkou, aby byl zachován trvalý styk hlavy ojnice s víkem ojnice je velikost síly předpětí vyvolané dotažením ojničních šroubů, která musí být větší než síla připadající na ojniční šroub [4].

6.7.1 Tahové napětí v dříku šroubu



Obr.6.33 – Šroubový spoj

Parametry šroubu:

| | |
|-------------------------------------|---|
| Materiál šroubu: | 15230.7 |
| Průměr hlavy šroubu: | $D_1 = 12$ [mm] |
| Průměr díry šroubu: | $D_0 = 9,4$ [mm] |
| Průměr střední části dříku šroubu: | $d_2 = 8$ [mm] |
| Vnější průměr závitu: | $d_0 = 9$ [mm] |
| Utahovací moment: | $M_U = 76,09$ [N/m] |
| Rozteč závitu: | $p_z = 1,5$ [mm] |
| Součinitel tření pod hlavou šroubu: | $f_H = 0,2$ [-] |
| Součinitel tření závitu šroubu: | $f_Z = (0,12 - 0,18) \Rightarrow$ volím 0,15 |
| | $f_Z = 0,15$ |
| Délka dříku šroubu: | $L_2 = 24,5$ [mm] |
| Délka závitové části dříku šroubu: | $L_1 = 14$ [mm] |
| Délka otvoru pro ojniční šroub: | $L_0 = 51,5$ [mm] |
| Průřez dříku šroubu: | $S_2 = 1,138 \cdot 10^{-4}$ [m ²] |

Průřez závitové částí:
Plocha v níž se stýká víko s tělesem ojnice:
(připadající na 1.ojniční šroub)

$$S_1 = 6,36 \cdot 10^{-5} [\text{m}^2] \\ S_0 = 2,659 \cdot 10^{-4} [\text{m}^2]$$

Vypočítané hodnoty:

Průměr na kterém působí třecí síla šroubu:

$$d_1 = \frac{D_1 + D_0}{2} \quad (6.24) \\ d_1 = \frac{12 + 9,4}{2} \\ d_1 = 10,7 \text{ mm}$$

Úhel stoupání závitu:

$$\varphi_z = \arctg \frac{p}{\pi * D_0} \quad (6.25) \\ \varphi_z = \arctg \frac{1,5}{\pi * 9,4} \\ \varphi_z = 2,9^\circ$$

Osová síla:

$$F_Q = \frac{M_U}{\text{tg } \varphi_z * \frac{D_0}{2} + f_z * \frac{D_0}{2} + f_H * \frac{d_1}{2}} \quad (6.26) \\ F_Q = \frac{76,09}{\text{tg } 2,9^\circ * \frac{0,0094}{2} + 0,15 * \frac{0,0094}{2} + 0,2 * \frac{0,0107}{2}} \\ F_Q = 27995 \text{ N}$$

Tahové napětí ve střední části dříku šroubu:

$$\sigma_T = \frac{F_Q * 4}{\pi * d_2^2} \quad (6.27) \\ \sigma_T = \frac{27995 * 4}{\pi * 8^2} \\ \sigma_T = 556,94 \text{ MPa}$$

Podmínka pro trvalý styk tělesa ojnice s víkem:

$$F_{PR} > F_{SP1} \quad (6.28)$$

Velikost setrvačné síly připadající na 1.šroub:

$$F_{SP1} = \frac{F_{SP}}{i} \quad (6.29)$$

$$F_{SP1} = \frac{10263}{2}$$

$$F_{SP1} = 5131,5$$

Volba síly od předpětí:

$$F_{PR} = (2 \div 3)F_{SP1} \Rightarrow \text{volím } 2,5 \quad (6.30)$$

$$F_{PR} = 2,5 * 5131,5$$

$$F_{PR} = 12829N$$

Součinitel poddajnosti ojničního šroubu:

$$K_S = \sum_{j=1}^n \frac{L_j}{E * S_j} = \frac{L_1}{E * S_1} + \frac{L_2}{E * S_2} \quad (6.31)$$

$$K_S = \frac{0,014}{2,1 \cdot 10^{11} * 6,36 \cdot 10^{-5}} + \frac{0,0245}{2,1 \cdot 10^{11} * 1,138 \cdot 10^{-4}}$$

$$K_S = 2 \cdot 10^{-9} N \cdot m^{-1}$$

Součinitel poddajnosti ojnice:

$$K_0 = \frac{L_0}{E * S_0} \quad (6.32)$$

$$K_0 = \frac{0,515}{2,1 \cdot 10^{11} * 2,659 \cdot 10^{-4}}$$

$$K_0 = 9,22 \cdot 10^{-10} N \cdot m^{-1}$$

Součinitel κ v případě spojení víka a ojnice šroubem:

$$\kappa = \frac{K_0}{K_0 + K_S} \quad (6.33)$$

$$\kappa = \frac{9,22 \cdot 10^{-10}}{9,22 \cdot 10^{-10} + 2 \cdot 10^{-9}}$$

$$\kappa = 0,461$$

Maximální síla namáhající ojnicí šroub na tah:

$$F_S = F_{PR} + \kappa * F_{SP1} \quad (6.34)$$

$$F_S = 12829 + (0,461 * 5131,5)$$

$$F_S = 15194,2 \text{ N}$$

Únavové namáhání

a) V nejmenším průřezu dříku šroubu:

$$\sigma_{MAX} = \frac{F_S}{S_S} \quad (6.35)$$

$$\sigma_{MAX} = \frac{15194,2}{5,02 \cdot 10^{-5}}$$

$$\sigma_{MAX} = 302,66 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{MIN} = \frac{F_{PR}}{S_S} \quad (6.36)$$

$$\sigma_{MIN} = \frac{12829}{5,02 \cdot 10^{-5}}$$

$$\sigma_{MIN} = 255,55 \text{ MPa}$$

Maximální napětí cyklu: $\sigma_{MAX} = 302,66 \text{ MPa}$

Minimální napětí cyklu: $\sigma_{MIN} = 255,55 \text{ MPa}$

Střední napětí cyklu:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{MAX} + \sigma_{MIN}}{2} \quad (6.37)$$

$$\sigma_m = \frac{302,66 + 255,55}{2}$$

$$\sigma_m = 279 \text{ MPa}$$

Rozkmit napětí:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{MAX} - \sigma_{MIN}}{2} \quad (6.38)$$

$$\sigma_a = \frac{302,66 - 255,55}{2}$$

$$\sigma_a = 23,55 \text{ MPa}$$

součinitel koncentrace napětí: $K_\sigma = 4$
součinitel absolutní velikosti: $\xi_\sigma' = 1$
součinitel opracování povrchu: $\xi_\sigma'' = 0,8$

Maximální napětí:

$$\sigma_{\max} = \frac{K_\sigma}{\xi_\sigma' \cdot \xi_\sigma''} \cdot \sigma_a + \sigma_m \quad (6.39)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{4}{1 \cdot 0,8} \cdot 23,55 + 279$$

$$\sigma_{\max} = 396,75 \text{ MPa}$$

Míra bezpečnosti:

$$\sigma_D = (400 \div 700) \text{ MPa} \Rightarrow \text{volím } 700 \text{ MPa}$$

$$n_\sigma = \frac{\sigma_D}{\sigma_{\max}} \quad (6.40)$$

$$n_\sigma = \frac{700}{396,75}$$

$$n_\sigma = 1,8 \Rightarrow \text{Z hlediska bezpečnosti vyhovuje}$$

b) V jádru závitu:

$$\sigma_{\max}^z = \frac{F_s}{S_j} \quad (6.41)$$

$$\sigma_{\max}^z = \frac{15194,62}{6,36 \cdot 10^{-5}}$$

$$\sigma_{\max}^z = 238,9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min}^z = \frac{F_{PR}}{S_j} \quad (6.42)$$

$$\sigma_{\min}^z = \frac{12829}{6,36 \cdot 10^{-5}}$$

$$\sigma_{\min}^z = 201,71 \text{ MPa}$$

Maximální napětí cyklu: $\sigma_{\max} = 238,9 \text{ MPa}$

Minimální napětí cyklu: $\sigma_{\min} = 201,71 \text{ MPa}$

Střední napětí cyklu:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{MAX}} + \sigma_{\text{MIN}}}{2} \quad (6.43)$$

$$\sigma_m = \frac{238,9 + 201,71}{2}$$

$$\sigma_m = 220,3 \text{ MPa}$$

Rozkmit napětí:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\text{MAX}} - \sigma_{\text{MIN}}}{2} \quad (6.44)$$

$$\sigma_a = \frac{238,9 - 201,71}{2}$$

$$\sigma_a = 18,6 \text{ MPa}$$

součinitel koncentrace napětí:

$$K_\sigma = 4$$

součinitel absolutní velikosti:

$$\xi_\sigma' = 1$$

součinitel opracování povrchu:

$$\xi_\sigma'' = 0,8$$

Maximální napětí:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{K_\sigma}{\xi_\sigma' \cdot \xi_\sigma''} \cdot \sigma_a + \sigma_m \quad (6.45)$$

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{4}{1 \cdot 0,8} \cdot 18,6 + 220,3$$

$$\sigma_{\text{max}} = 313,3 \text{ MPa}$$

Míra bezpečnosti:

$$\sigma_D = (400 \div 700) \text{ MPa} \Rightarrow \text{volím } 700 \text{ MPa}$$

$$n_\sigma = \frac{\sigma_D}{\sigma_{\text{max}}} \quad (6.46)$$

$$n_\sigma = \frac{700}{313,3}$$

$$n_\sigma = 2,2 \Rightarrow \text{Z hlediska bezpečnosti vyhovuje}$$

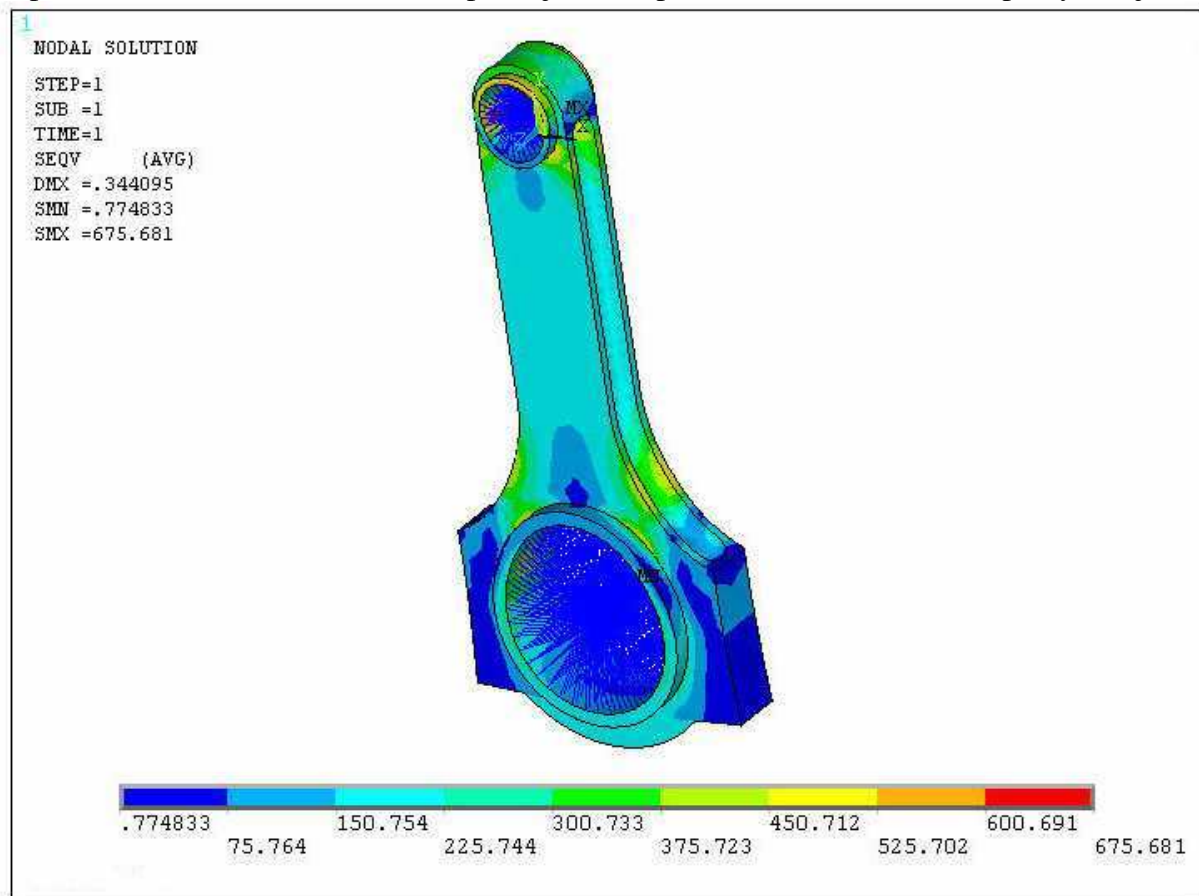
Závěr:

Míra bezpečnosti při únavovém namáhání má být v rozmezí $1,5 \div 2$. Bezpečnost v nejmenším průřezu dřívku šroubu vyšla **1,8** a v jádru závitu **2,2**. Z hlediska požadované bezpečnosti šroubového spojení tyto bezpečnosti vyhovují.

6.9. Výsledky pevnostní analýzy

6.9.1 Stávající model ojnice

Pro zobrazení výsledků pevnostní analýzy byl vybrán stav, kdy na horní oko působila maximální síla od tlaku plynů. V našem případě to bylo při 368° natočení klikového hřídele, tedy 8° za horní úvratí při expanzním zdvihu. Pro zobrazení výsledků napjatosti jsou vybrána redukovaná napětí v jednotlivých uzlech ojnice. Výsledek pevnostní analýzy je zobrazen na **obr.6.34**. Z výpočtu pevnostní analýzy je patrné, že největšího redukovaného při daném stavu zatížení je dosaženo v přechodu dříku ojnice do horního oka ojnice. Redukované napětí se v tomto místě pohybuje kolem hodnoty 450 MPa. Stejného redukovaného napětí bylo dosaženo v přechodu dříku ojnice do hlavy ojnice. Hodnota redukovaného napětí ve víku ojnice se pohybuje kolem 150 MPa. Je ovšem nutno podotknout, že v tomto případě nebylo podrobněji řešeno víko ojnice, zejména žebro ojnice, které můžeme vidět na modelu ojnice viz. obr.5.4. Analýzu bez tohoto žebra jsem provedl, abych získal prvotní výsledky, ze kterých pak budou následovat konstrukční úpravy ojnice. Přibližně stejných hodnot bylo dosaženo v dříku ojnice. Dále ve výpočtu nebylo uvažováno s rádiusy přechodu dříku ojnice do horního a dolního oka ojnice. Bylo to z důvodu, že tyto rádiusy nabíraly malých hodnot, které se projevovaly problémy s vytvořením sítě na povrchu ojnice. Z výsledku je zřejmé, že tyto rádiusy ovlivnily velikost redukovaného napětí v přechodu dříku ojnice jak do horního tak i do dolního oka ojnice. Hodnoty redukovaných napětí v uzlech, které leží na přechodu dříku ojnice do oka ojnice dosahovaly hodnot kolem 450 MPa. Z pevnostní analýzy je ještě vidět, že hodnoty redukovaných napětí v uzlech tvořících vnitřní plochu horního oka bylo dosaženo napětí kolem 600 MPa. V další fázi práce je nutno provést další konstrukční úpravy na ojnici.



Obr.6.34 – MKP analýza

Jako kritická místa na ojnici jsem označil přechod dříku ojnice do horního oka ojnice a přechod dříku v dolním oku ojnice. S výsledků této pevnostní analýzy budeme vycházet v následujících výpočtech.

6.9.2 Upravená ojnice

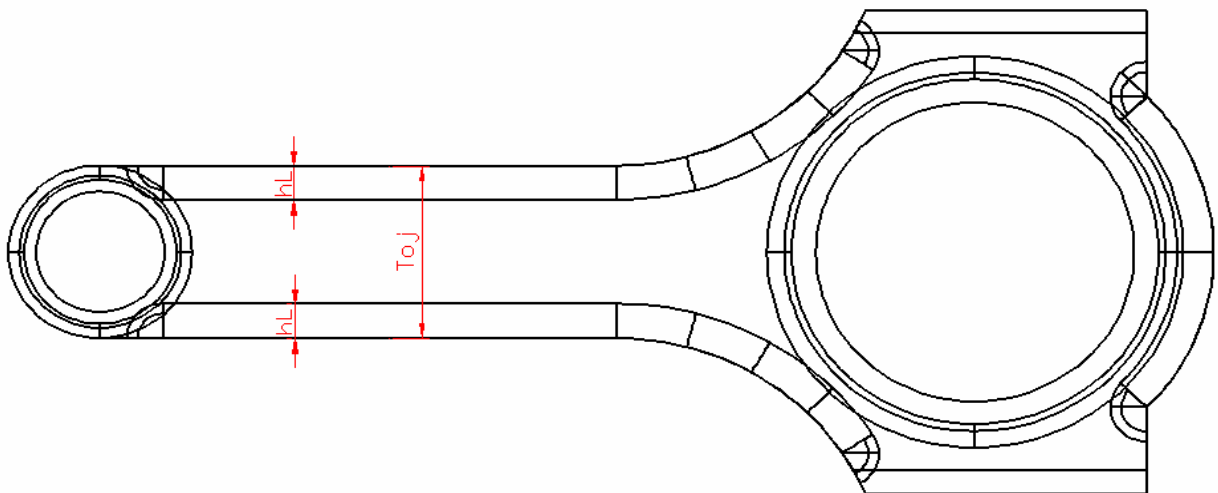
V další fázi práce jsem provedl malé konstrukční úpravy ojnice a posoudil jejich míru vlivu na výslednou pevnost ojnice. Nový model ojnice byl totožný s původním modelem ojnice, která je na obrázku 5.4. V následujícím výpočtu jsem tedy již počítal s detailněji konstruovaným žebrem víka ojnice, taktéž jsem dodělal radiusy a důležitou věcí, která se projevila na pevnosti ojnice bylo ztenčení žebra na dříku ojnice. (viz. obr. 6.36). Původní tloušťka tohoto žebra byla 2,5 mm. Žebro bylo ztenčeno na 1,5 mm (viz. obr. 6.36). Délka vybrání drážky v dříku ojnice byla zkrácena o 3,5 mm na 4 mm. Počítáno od osy horního oka ojnice která je kolmá na osu ojnice procházející horním a dolním okem. Všechny ostatní parametry ojnice které jsou uvedeny v kapitole 4.2 zůstaly nezměněny. Tloušťka ojnice zůstala také stejná tedy 15 mm. Co se týká míru vlivu tloušťky a žebra dříku, tak tomuto problému budou věnovány následující kapitoly.

Původní model:

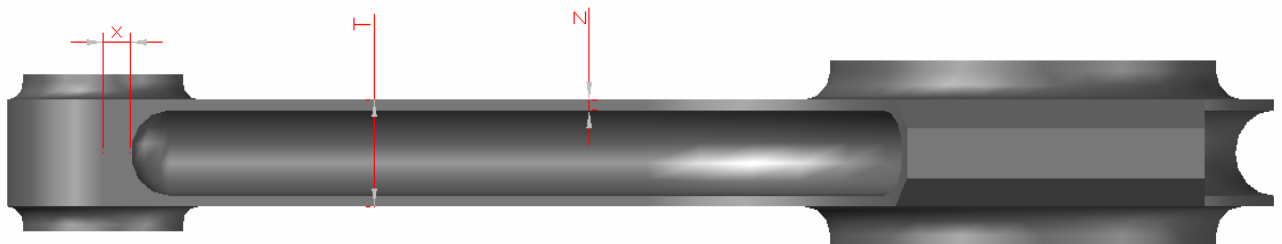
$x = 0,5 \text{ mm}$
 $T = 15 \text{ mm}$
 $z = 2,5 \text{ mm}$
 $h_L = 5 \text{ mm}$
 $T_{oj} = 30 \text{ mm}$

Nový model:

$x = 4,5 \text{ mm}$
 $T = 15 \text{ mm}$
 $z = 1,5 \text{ mm}$
 $h_L = 6 \text{ mm}$
 $T_{oj} = 30 \text{ mm}$



Obr.6.35 – Nově upravený model ojnice – pohled shora

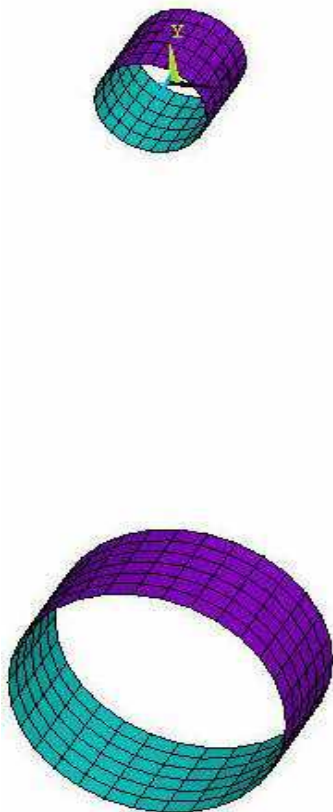


Obr.6.36 – Nově upravený model ojnice

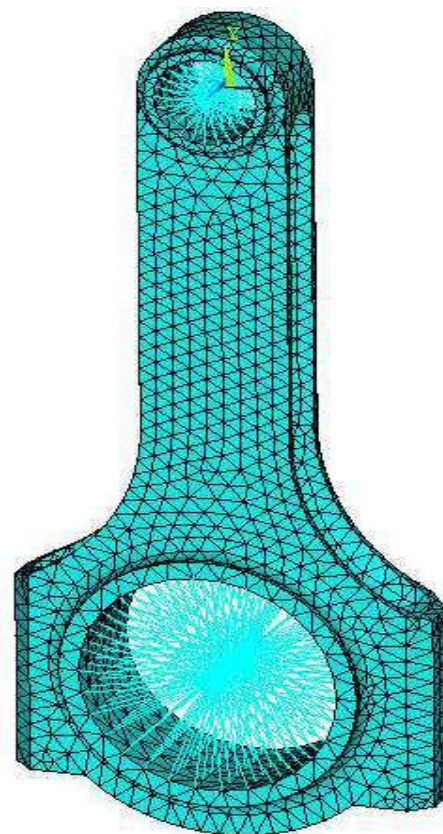
Postup přípravy ojnice před spuštěním výpočetního procesu je totožný s postupem uvedeným v kapitole 6.5. Tento postup bude aplikován v následujících kapitolách. Jediné změny, které jsem v následujícím postupu provedl:

a) Dělení horního a dolního oka ojnice

- **horní oko** bylo rozděleno po obvodu na 24 dílů a v ose oka na 5 dílů
- **dolní oko** ojnice bylo rozděleno po obvodu na 30 dílů a v ose oka na 6 dílů
- z těchto změn plyne rozdělení síly působící ve směru ojnice do 6.uzlů



Obr.6.37 – Dělení ok

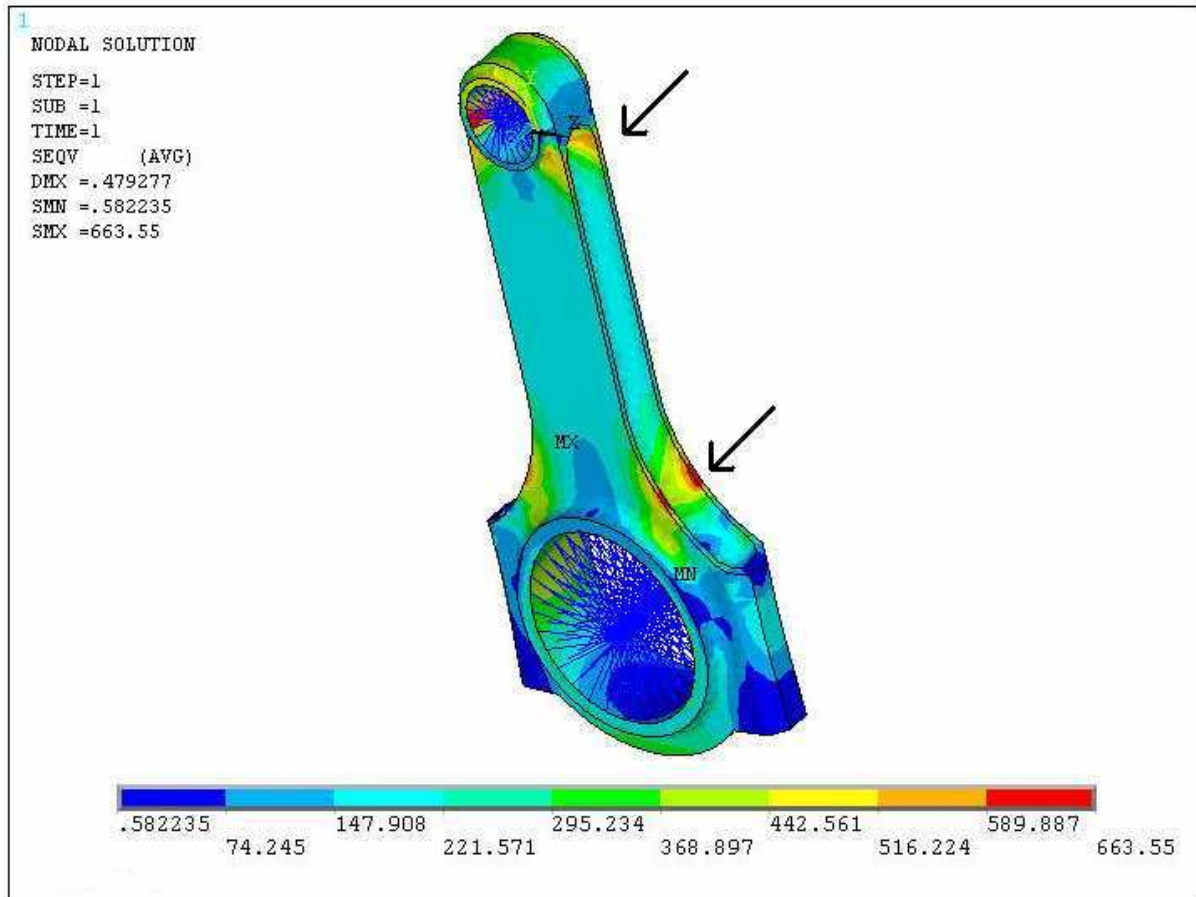


Obr.6.38 – Vysíťování objemu ojnice

b) Vysíťování objemu ojnice

- na vysíťování objemu ojnice byl použit typ elementu SOLID 187 na rozdíl od předchozího elementu SOLID 92.
- tento typ elementu byl zvolen z důvodu doděláním rádiusů a úkosů na ojnici, zejména v přechodech dráku ojnice do horního a dolního oka.

Jako zátěžný stav jsem opět zvolil úhel natočení klikového hřídele 368^0 , při kterém bylo dle hodnot viz.příloha 1. dosaženo největších sil od tlaku plynů působících na horní oko ojnice. Na obrázku **6.39** jsou výsledky této analýzy. Pro zobrazení výsledků nabídnutých programech ANSYS byla opět vybrána možnost (Von Misses), která nám umožní zobrazit redukovaná napětí v jednotlivých uzlech modelu ojnice.



Obr.6.39 – Analýza upraveného modelu dle obr.6.36

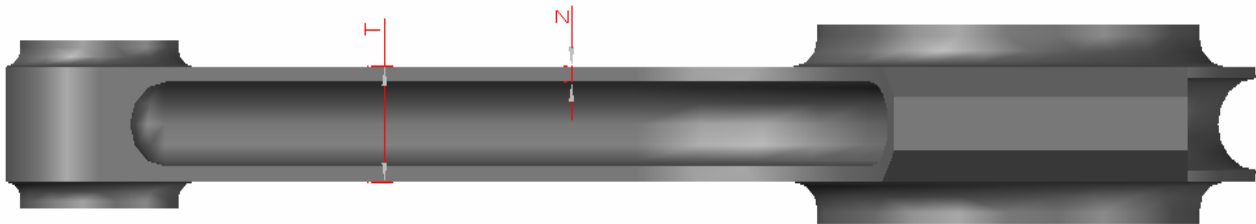
Jak bylo uvedeno v části podkapitoly 6.9.2, tak v upraveném modelu ojnice došlo ke ztenčení žebra dřívku, označeného písmenem **z**. Dále pak k úpravě vzdálenosti **x** (viz.**obr.6.36**).Z výsledků pevnostní analýzy dle **obr.6.36** je vidět, že po ztenčení žebra došlo sice ke snížení celkové hmotnosti ojnice, což je samozřejmě kladem, ale naopak došlo ke snížení pevnosti ojnice v kritických místech jakými jsou přechody dřívku ojnice do horní a dolního oka ojnice.Tyto kritické oblasti jsou označeny šipkami na **obr.6.36**.V uzlech které tvoří přechod ojnice do dolního oka (označené šipkami viz.**obr.6.39**) se redukovaná napětí pohybuje od hodnot 590 až 665 MPa.O proti předchozímu analyzovanému modelu ojnice došlo v tomto místě k nárůstu redukovaného napětí téměř o 30%. Ke stejným výsledkům se došlo i v přechodu dřívku ojnice do horního oka ojnice.V těchto místech došlo ke zvýšení redukovaného napětí o 22%.

Ze těchto výsledků plyne, jak již bylo řečeno, že došlo ke snížení hmotnosti ojnice, ale v kritických místech naopak došlo ke zvýšení redukovaných napětí.

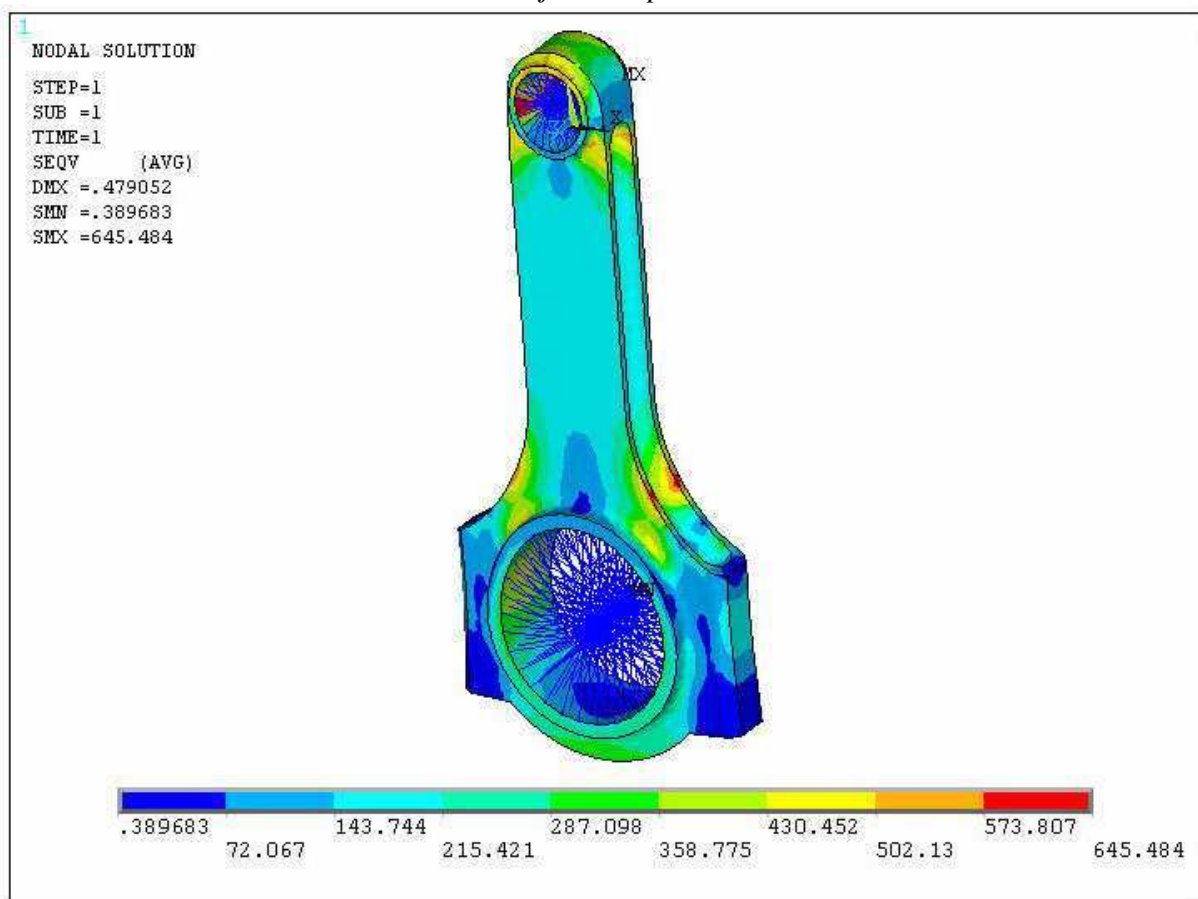
V další fázi práce jsem provedl další změny na modelu ojnice. U předešlých modelů byla analyzována ojnice s tloušťkou $T = 15$ mm žebřem $z = 2,5$ a $1,5$ mm. Vzhledem k zjištěným výsledkům se nejevila výhodná ani jedna varianta těchto ojníc.U ojnice s tloušťkou $z = 2,5$ mm sice vycházely menší redukovaná napětí v kritických místech označených šipkami, ale

tloušťka žebra ojnice **z** se jeví příliš velká, než je řešena u soudobých ojnic závodně laděných motorů. U druhé varianty je tloušťka díku **z** vzhledem k tloušťce ojnice **T** vzhledem k získaným výsledkům malá. Z těchto závěrů plyne, že v následujícím výpočtu byla zanalyzována ojnice s tloušťkou $z = 2 \text{ mm}$. Tloušťka **T** zůstává stejná. Zadání typu elementů, materiálových vlastností, reálných konstant, vysíťování ojnice její zavazbení a zadání okrajových podmínek pro výpočet zůstává stejný jako v předchozí kapitole, proto nebude znova popisován.

T = 15 mm
z = 2 mm
 $h_L = 5,5 \text{ mm}$



Obr.6.40 – Model ojnice s upravenou tloušťkou z



Obr.6.41 – Analýza ojnice s upravenou tloušťkou $z = 2 \text{ mm}$

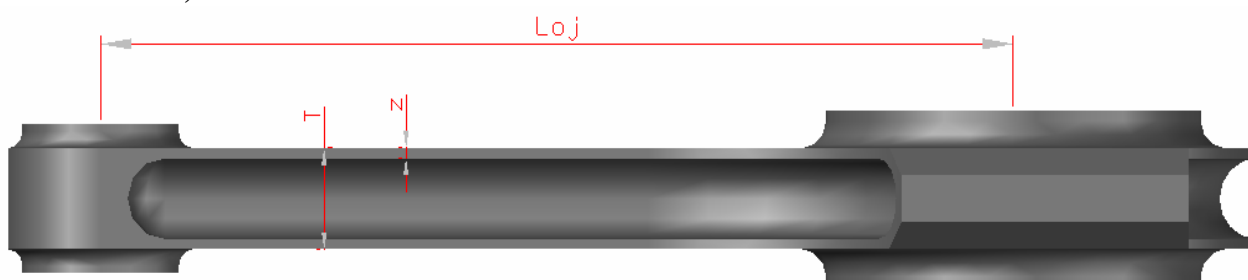
Dle očekávání došlo ke snížení redukovaných napětí v uzlech, které tvoří kritická místa označená na předchozí analýze (viz. **obr.6.39**). V přechodu díku ojnice do horního oka došlo u

takto upravené ojnice s tloušťkou z na 2 mm z původní tloušťky 1,5 mm k poklesu redukovaného napětí o 2,7% a v přechodu dřívku do dolního oka asi o 2,8 %. Ve všech předchozích analýzách byla kontrolována ojnice s neměnnou tloušťkou $T = 15$ mm a proměnlivou $z = 1.5$ až 2 mm. V následujících kapitolách přistoupíme ke změnám tloušťky T .

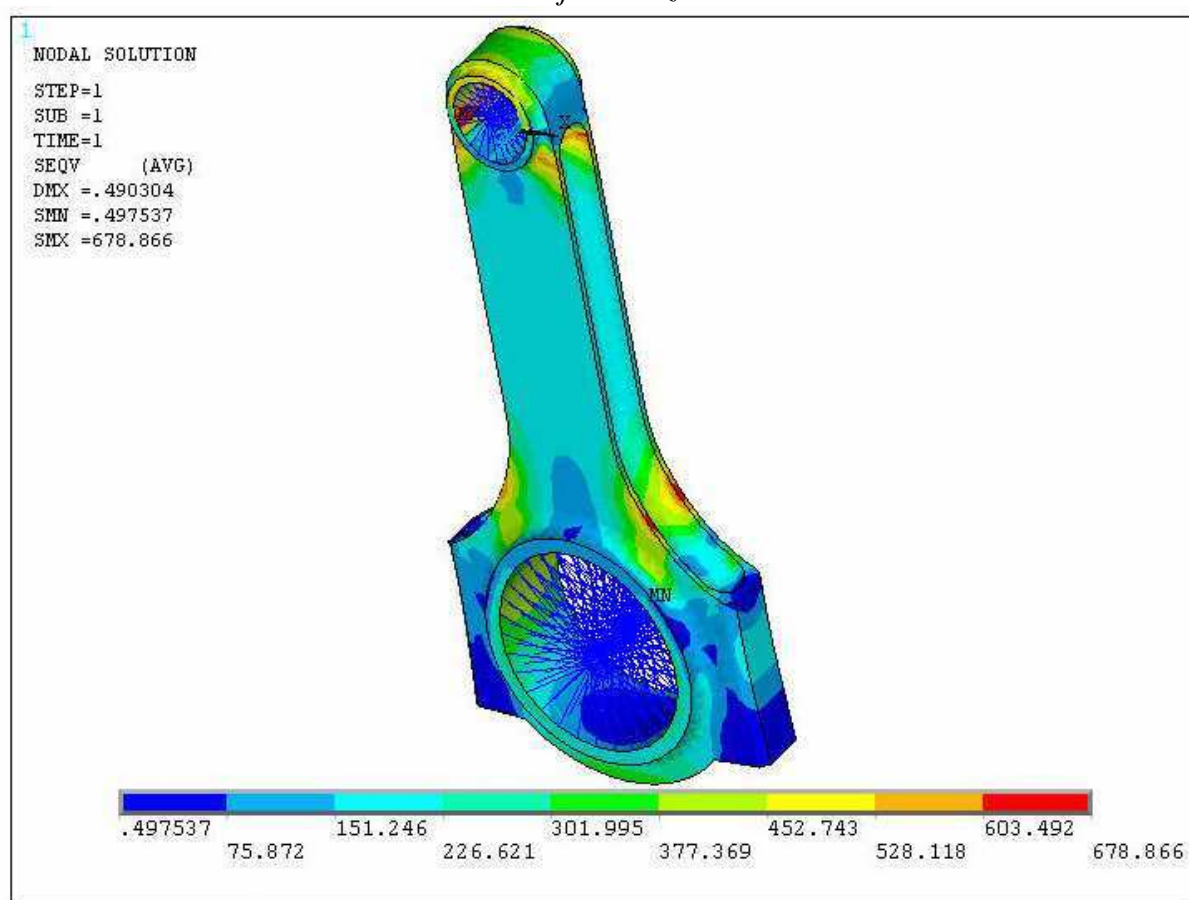
6.9.3 Vliv změny délky ojnice na výslednou pevnost

Ještě než přistoupíme ke změnám tloušťky T , tak posoudíme míru vlivu změny délky ojnice L_{OJ} výslednou pevnost ojnice. Pro první analýzu byla zvolena délka $L_{OJ} = 146$ mm a potom ještě 148 mm. Tloušťka ojnice $T = 15$ mm byla zachována.

- a) $L_{OJ} = 146$ mm $h_L = 6$ mm
 $T = 15$ mm
 $z = 1,5$ mm



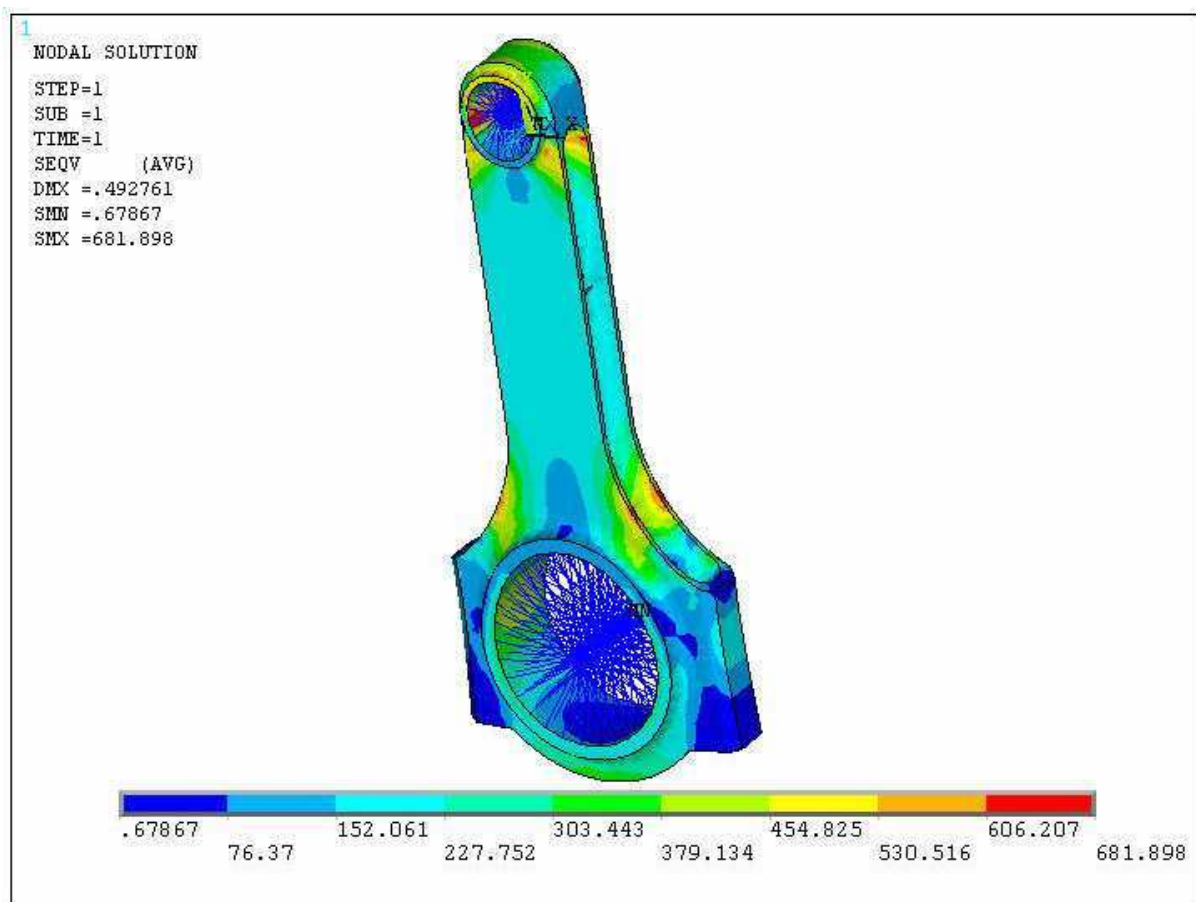
Obr.6.42 – Ojnice se změněnou délkou



Obr.6.43 – Analýza ojnice s upravenou délkou $L_{Oj} = 146$ mm

V porovnání s výsledky analyzované ojnice dle **obr.6.39**, která měla stejné parametry tloušťky ojnice a žebra ojnice, vzrostlo u ojnice prodloužené o 3mm k nárůstu redukovaného napětí v uzlech přechodu dřívku ojnice do horního oka o 2,5% a v přechodu do dolního oka asi o 2,1%. O předchozím modelům ojnic se zadanými parametry došlo podle předpokladu ke zvýšení redukovaného napětí v uzlech dřívku ojnice téměř o 5%. Lze předpokládat, že při dalším zvětšení délky ojnice dojde k nárůstu těchto napětí při již zmíněných tloušťkách.

- b) $L_{OJ} = 148 \text{ mm}$ $h_L = 6 \text{ mm}$
 $T = 15 \text{ mm}$
 $z = 1,5 \text{ mm}$



Obr.6.44 – Analýza ojnice s upravenou délkou $L_{oj}=148 \text{ mm}$

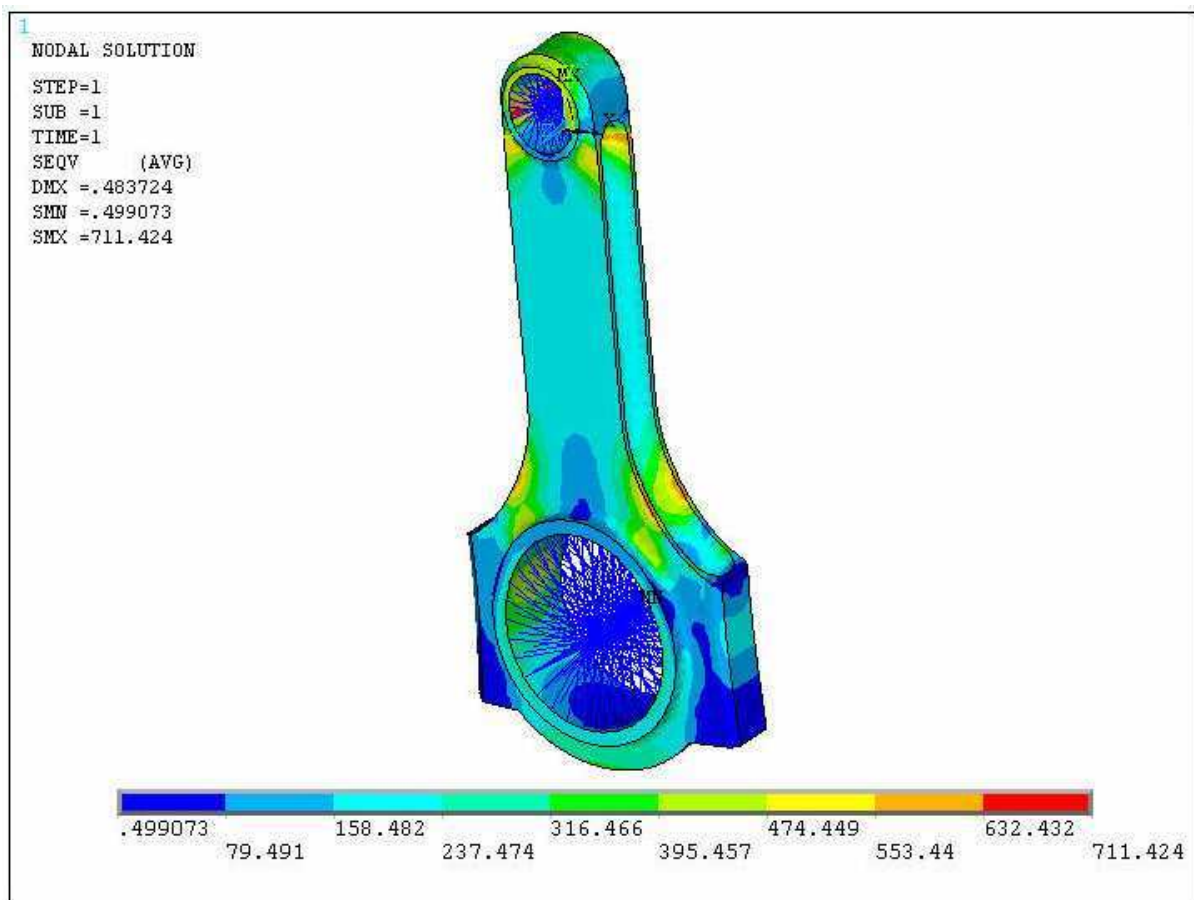
Dle již výše uvedených předpokladů došlo k nárůstu redukovaného napětí v kritických místech popsaných v předchozích kapitolách. Redukované napětí se oproti ojnici s roztečí 146 mm zvýšilo o 0,4% v uzlech tvořících přechod dřívku ojnice do horního oka a o 0,47% v dolním oku. Z takto získaných výsledků jak pro délku 146mm tak pro délku 148 mm lze říci, že úpravou délek nedošlo k celkovému zvýšení pevnosti ojnice. Délky byly změněny pouze pro tloušťku $T = 15 \text{ mm}$ a $z = 1,5 \text{ mm}$, protože lze předpokládat, že při změnách parametru z u těchto délek bychom nedosáhli jiných výsledků než ve výše uvedených analýzách s původní délkou 143mm.

V následujících analýzách, které budou následovat se zaměříme na změny parametru tloušťky ojnice T pro zadané tloušťky dřívku ojnice z a parametru h_L .

6.9.4 Vliv změny tloušťky ojnice na výslednou pevnost

Jak již bylo výše řečeno, tak se tato kapitola bude věnovat citlivosti změny tloušťky ojnice **T** na výslednou pevnost ojnice. Pro tato řešení jsem navrhl ojnice s třemi různými tloušťkami 16, 17 a 18 mm. Pro takto stanovené tloušťky budeme opět po kroku 0,5 mm měnit parametr ojnice **z** od hodnoty 1,5 do 2,5 mm. Takto získané výsledky budou porovnány a zhodnoceny. Délka ojnice zůstane na hodnotě $L_{Oj} = 143\text{ mm}$.

- a) **T = 16 mm**
z = 1,5 mm
h_L = 6,5 mm

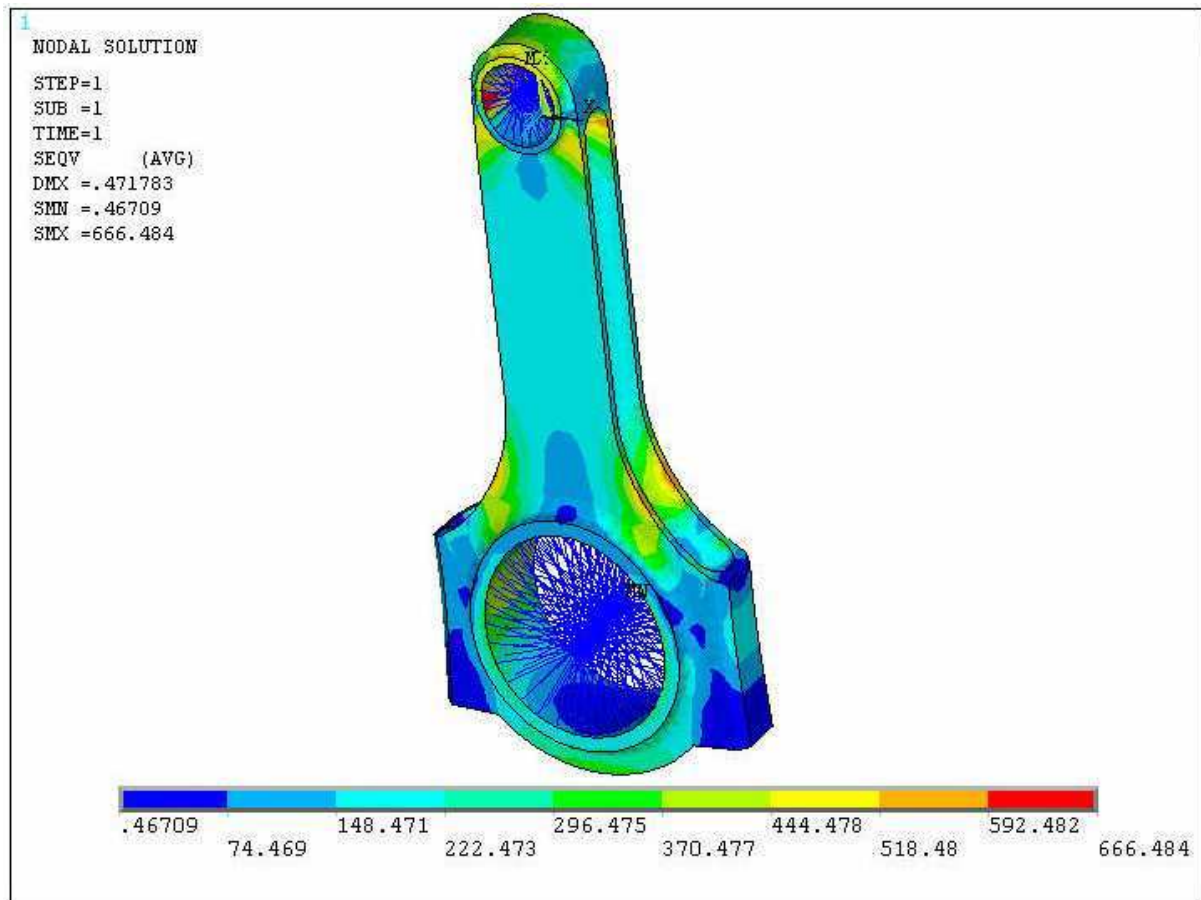


Obr.6.45 – Analýza ojnice s upravenou tloušťkou $T=16\text{ mm}$ a $z = 1,5\text{ mm}$

Výsledek této analýzy srovnáme s výsledkem, který je na **obr.6.39** na kterém je ojnice ze stejným parametrem **z** a tloušťkou $T = 15\text{ mm}$. Z výsledků je zřejmé, že upravená hodnota parametru **T** se projevila ve velikosti redukovaného napětí v uzlech tvořících kritická místa označená šipkami (viz.**obr.6.39**).

Redukované napětí v těchto místech dosahuje jak v horní tak v dolní části ojnice hodnot nižších o téměř o 6,5%. Lze tedy říci, že změnou hodnoty **T** na 16 mm došlo ke zvýšení pevnosti ojnice. Se zvýšením tloušťky došlo samozřejmě k nárůstu hmotnosti ojnice. V další fázi zvýšíme hodnotu parametru **z** při zachované tloušťce **T**.

- b) $T = 16 \text{ mm}$
 $z = 2 \text{ mm}$
 $h_L = 6 \text{ mm}$

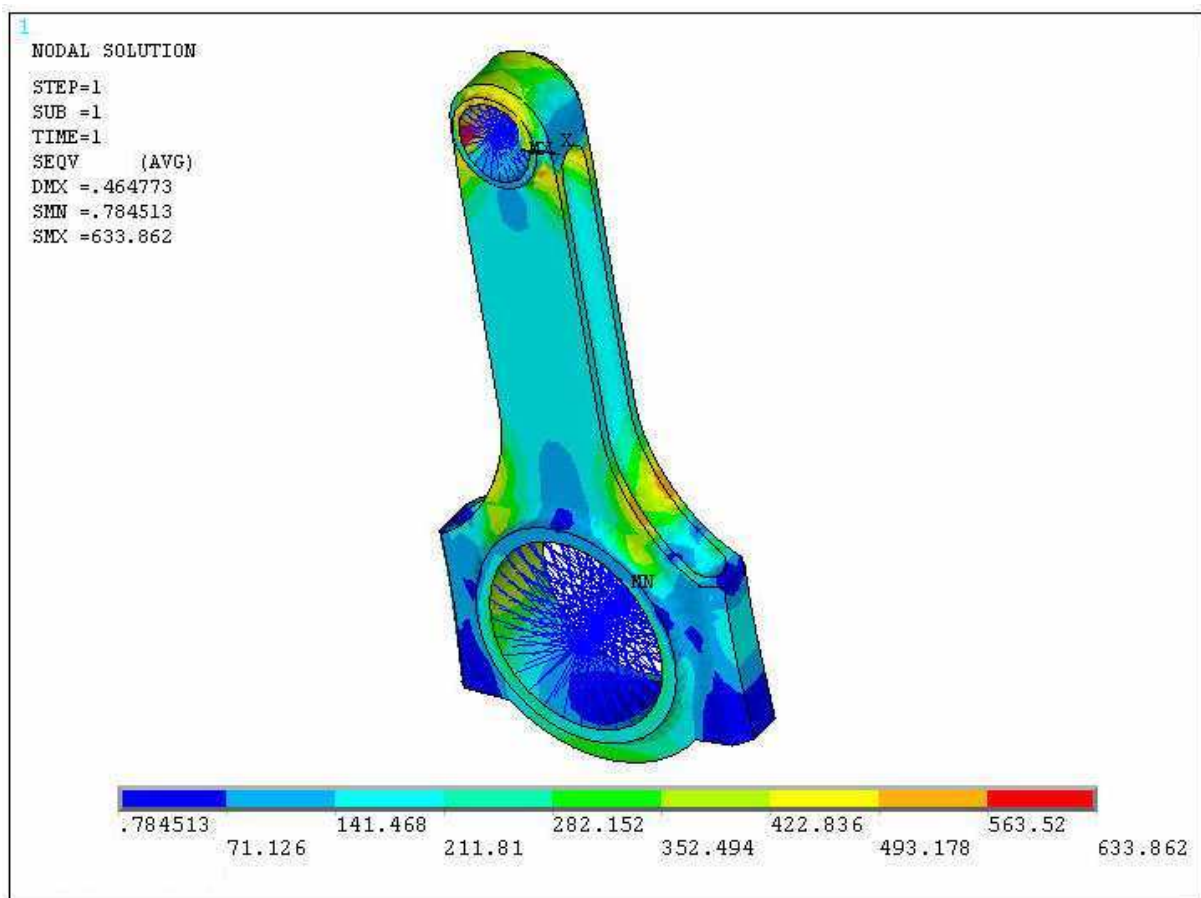


Obr.6.46 – Analýza ojnice s upravenou tloušťkou $T = 16 \text{ mm}$ a $z = 2 \text{ mm}$

Výsledek analýzy této ojnice se zvětšenou tloušťkou dřívku z o 0,5mm ukázal, že redukované napětí v uzlech kritických míst dosahuje ve srovnání s ojnicí z obr.6.41, kde byla o 1mm menší tloušťka T hodnot nižších téměř o 11%. Pro srovnání s předchozí řešenou ojnicí s tloušťkou $T = 16 \text{ mm}$ a $z = 1,5 \text{ mm}$ došlo ke snížení redukovaných v kritických místech téměř o 7%. Redukované napětí v uzlech tvořící dřív ojnice se také snížila, ale změny nebyly velké. Nyní zbývá pro tuto stanovenou tloušťku zvětšit parametr z opět o 0,5mm.

- c) $T = 16 \text{ mm}$
 $z = 2,5 \text{ mm}$
 $h_L = 5,5 \text{ mm}$

Z výsledků zobrazených na obr.6.47 můžeme vidět, že podle předpokladů došlo ke snížení redukovaného napětí v uvedených místech. Pro srovnání s předchozí ojnicí s parametrem $z = 2 \text{ mm}$ došlo při zvětšení tohoto parametru o 0,5 mm ke snížení napětí téměř o 5,5%. Ve srovnání s ojnicí, kde měla stejný parametr z , tedy 2,5 mm, ale jinou tloušťku T a to 15mm se napětí v přechodu dřívku ojnice do dolního oka v kritickém místě snížilo o 6,5%.



Obr.6.47 – Analýza ojnice s upravenou tloušťkou $T = 16 \text{ mm}$ a $z = 2,5 \text{ mm}$

K závěrečnému hodnocení ojnice s tloušťkou $T = 16 \text{ mm}$ a parametry $z = 1,5$ až $2,5 \text{ mm}$ lze říci, že došlo ke zvýšení pevnosti ojnice oproti tloušťce $T = 15 \text{ mm}$, ale samozřejmě na úkor hmotnosti ojnice. Proto ještě v následujících částech provedeme ještě zvýšení tloušťky ojnice a lze u něho předpokládat větší rozdíly ve výsledcích oproti tloušťce $T = 15 \text{ mm}$ než tomu bylo u předchozí verze s parametrem tloušťky $T = 16 \text{ mm}$.

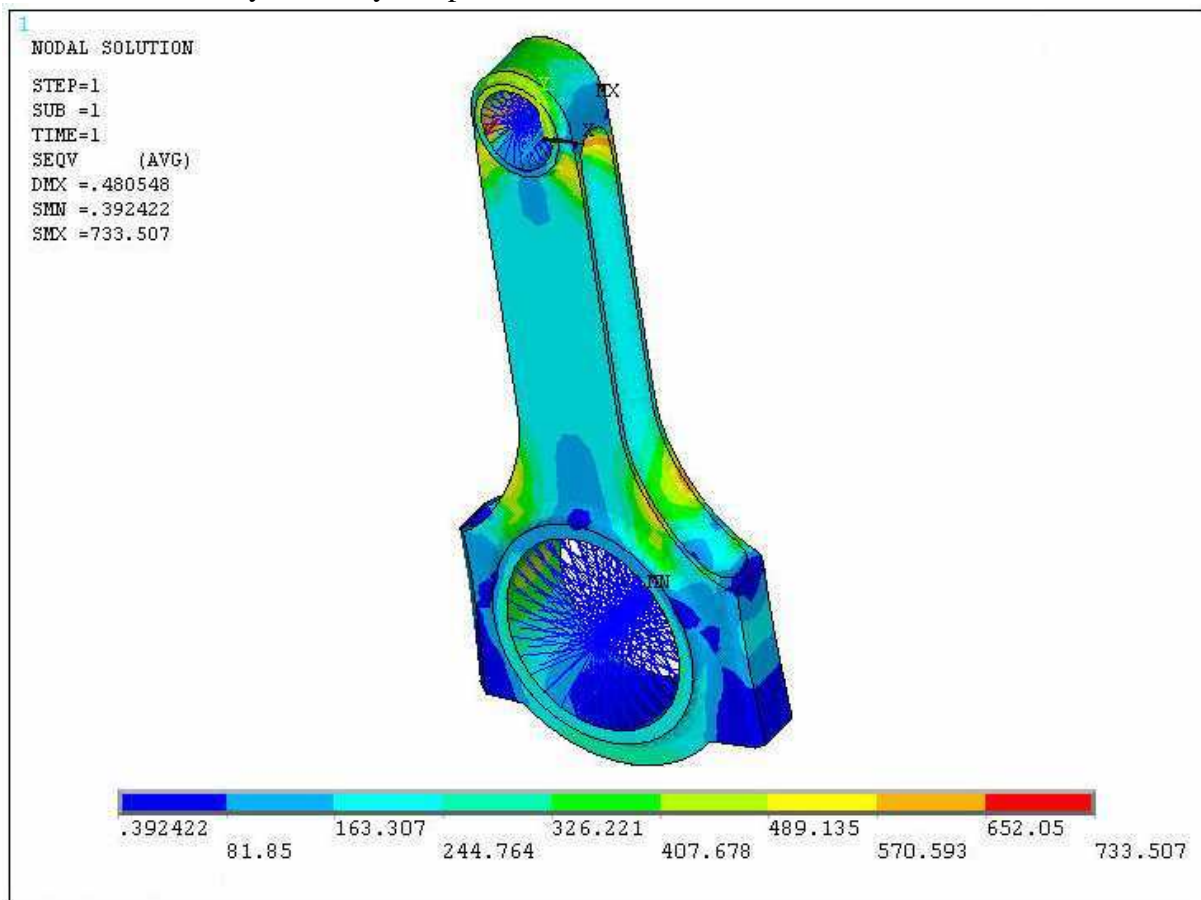
V následujících krocích provedeme zvýšení tohoto parametru na 17 resp. 18 mm . Parametr z opět budeme měnit po kroku $0,5 \text{ mm}$ a sledovat jeho míru vlivu na výslednou pevnost.

- d) $T = 17 \text{ mm}$
 $z = 1,5 \text{ mm}$
 $h_L = 7 \text{ mm}$

Na **obr.6.48** jsou výsledky pevnostní analýzy ojnice výše uvedených parametrů. Tuto ojnici porovnáme s výsledky dosaženými u předchozích analýz ojnic s tloušťkami T , 15 a 16 mm a to pro tloušťku žebra dřívku ojnice $z = 1,5 \text{ mm}$.

Hodnoty redukovaného napětí u této ojnice se v uzlech pohybuje v hodnotách o 5% nižších než tomu bylo u ojnice s tloušťkou $T = 15 \text{ mm}$ v přechodu dřívku ojnice do dolního oka. Dle předpokladů došlo v tomto místě v poklesu redukovaného napětí vůči ojnici s tloušťkou $T = 16 \text{ mm}$. Tam se hodnoty redukovaného napětí pohybovaly v hodnotách vyšších o $3,1\%$. Co se týká místa přechodu dřívku do horního oka, tak se výsledné hodnoty napětí v uzlech u ojnice

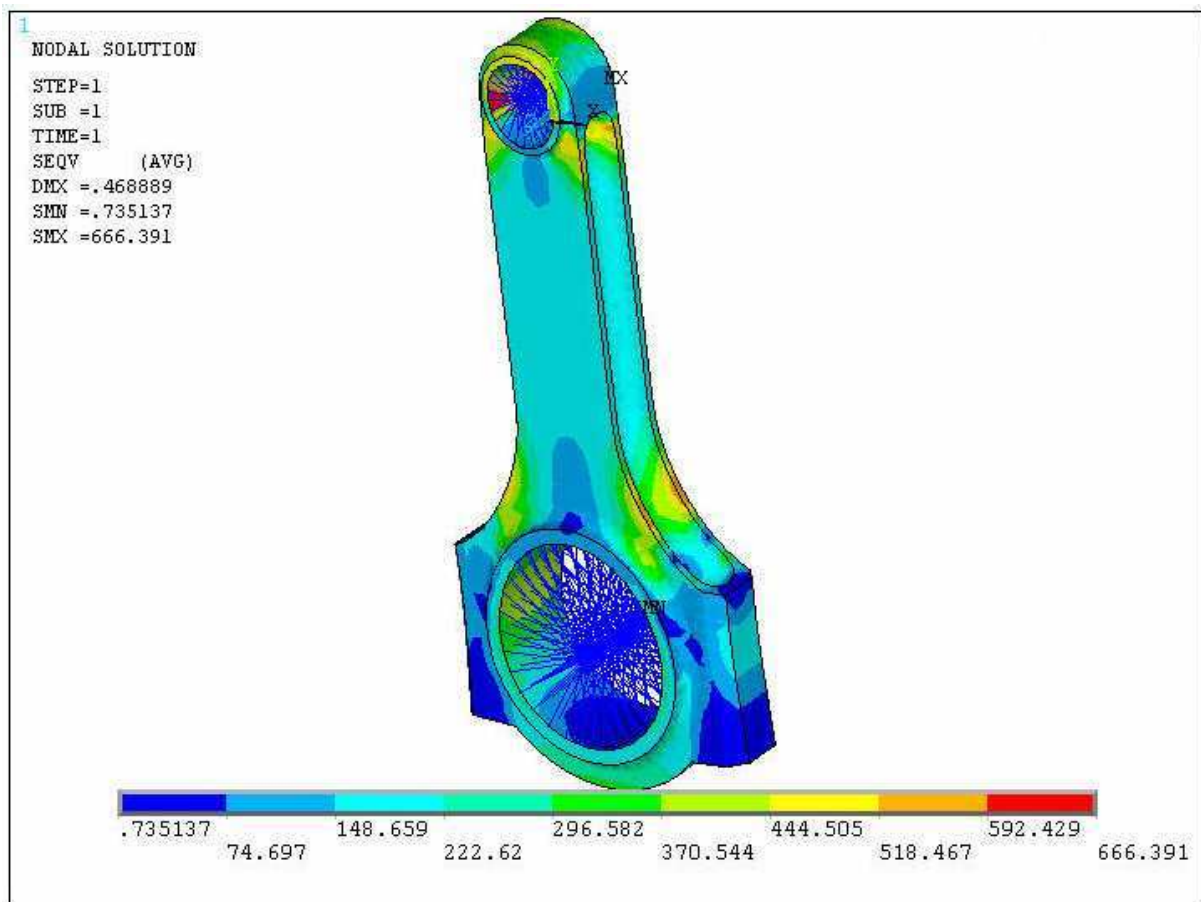
s tloušťkou $T = 17$ mm dosahují hodnot nižších téměř o 6,5% než bylo dosaženo u ojnice o tloušťce $T = 15$ mm. V porovnání s ojnicí o tloušťce $T = 16$ mm došlo ke snížení o 1,2%. Dalším krokem tedy bude zvýšení parametru z na 2 mm.



Obr.6.48 – Analýza ojnice s upravenou tloušťkou $T = 17$ mm a $z = 1,5$ mm

- e) $T = 17$ mm
 $z = 2$ mm
 $h_L = 6,5$ mm

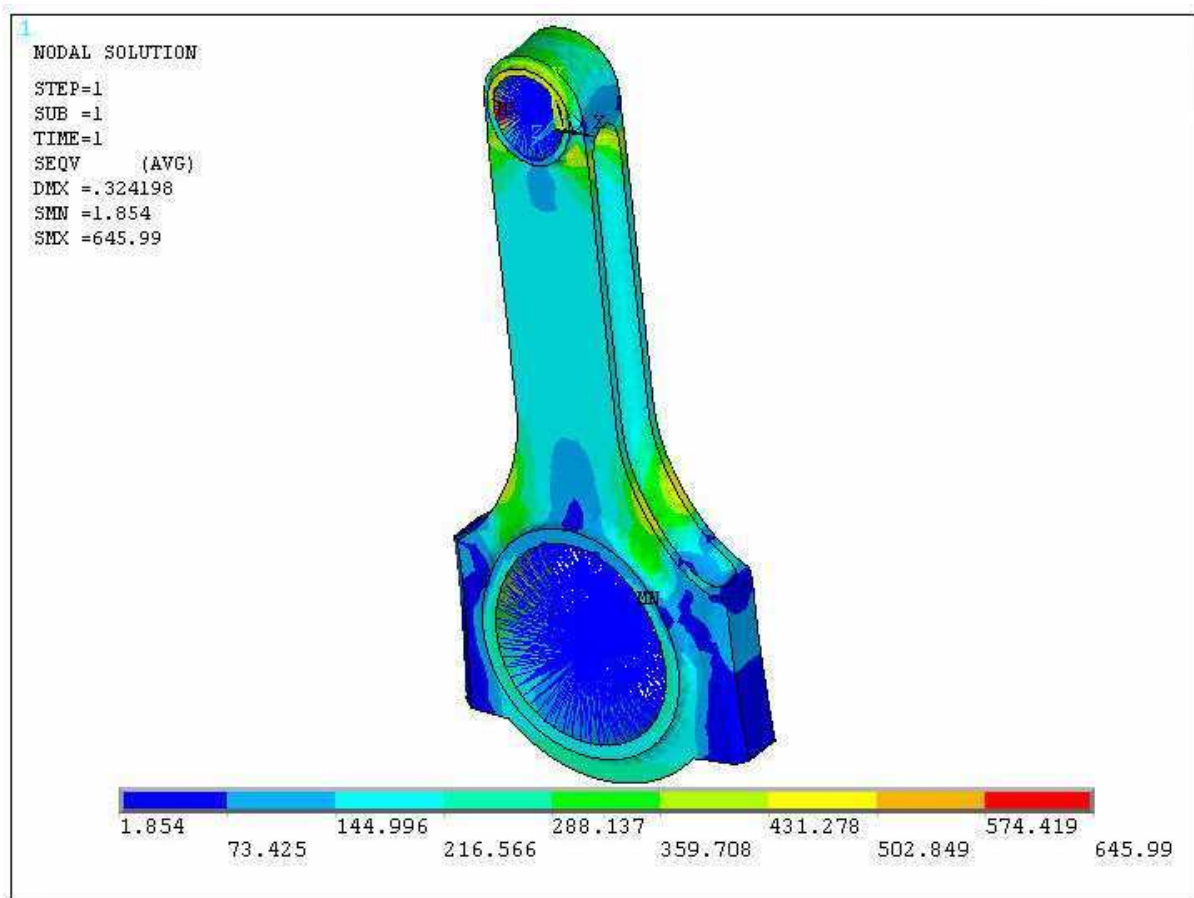
V této fázi jsme zanalyzovali ojnicí o tloušťce $T = 17$ mm a tloušťce žebra dříku ojnice $z = 2$ mm. Výsledek (viz.**obr.6.49**) ukazuje snížení redukovaného napětí oproti tloušťkám $T = 15, 16$ mm. Je ovšem zajímavé, že v porovnání s ojnicí o $T = 16$ mm a $z = 2$ mm se redukované napětí v uzlech na přechodu dříku do horního tak i do horního oka ojnice liší nepatrně. Jedná se o snížení redukovaného napětí v ojnici $T = 17$ mm o 0,009%. Tuto ojnicí můžeme porovnat i s ojnicí o tloušťce $T = 15$ mm. Ve srovnání výsledků s touto ojnicí došlo k poklesu redukovaného v uzlech označených jako kritická místa (viz.**obr.6.36**) o 3,2% na přechodu dříku ojnice do dolního oka. Naopak v uzlech tvořících přechod dříku do horního oka došlo k poklesu redukovaného napětí o 4,3%. Pro tuto tloušťku ještě zbývá upravit parametr z na 2,5 mm.



Obr.6.49 – Analýza ojnice s upravenou tloušťkou $T = 17 \text{ mm}$ a $z = 2 \text{ mm}$

- f) $T = 17 \text{ mm}$
 $z = 2,5 \text{ mm}$
 $h_L = 6 \text{ mm}$

Po zvětšení parametru tloušťky žebra dřívku ojnice na 2,5 mm došlo k poklesu redukovaného napětí v uzlech téměř o 5,7%, které tvoří přechod dřívku do dolního oka ojnice. V uzlech, které tvoří přechod dřívku ojnice do horního oka ojnice došlo k poklesu asi o 5,5%. Tyto výsledky byly zjištěny porovnáním s ojnici o tloušťce 16 mm a parametru $z = 2,5 \text{ mm}$. Provedeme ještě porovnání s ojnici o tloušťce $T = 15 \text{ mm}$ a pro stejný parametr z . V tomto porovnání bylo zjištěno, že došlo k poklesu redukovaného napětí v uvedených místech o 9%.



Obr.6.50 – Analýza ojnice s upravenou tloušťkou $T = 17 \text{ mm}$ a $z = 2,5 \text{ mm}$

Závěrem lze ke tloušťce ojnice 17 mm pro kterou jsme měnili parametr z od 1,5 do 2,5 mm říci, že došlo ke zvýšení pevnosti této ojnice. Výsledky byly porovnávány s tloušťkami 15, 16 mm a v některých výpočtech byly rozdíly redukovaných napětí v kontrolovaných místech minimální, zejména v porovnání ojnic s tloušťkami 15mm.

V poslední části ještě zvýšíme tloušťku ojnice na hodnotu 18 mm zase při parametrech $z = 1,5$ a $2,5 \text{ mm}$. Tady je možné předpokládat větší rozdíly v průbězích napětí oproti ojnici s tloušťkou 15mm.

- g) $T = 18 \text{ mm}$
 $z = 1,5 \text{ mm}$
 $h_L = 7,5 \text{ mm}$

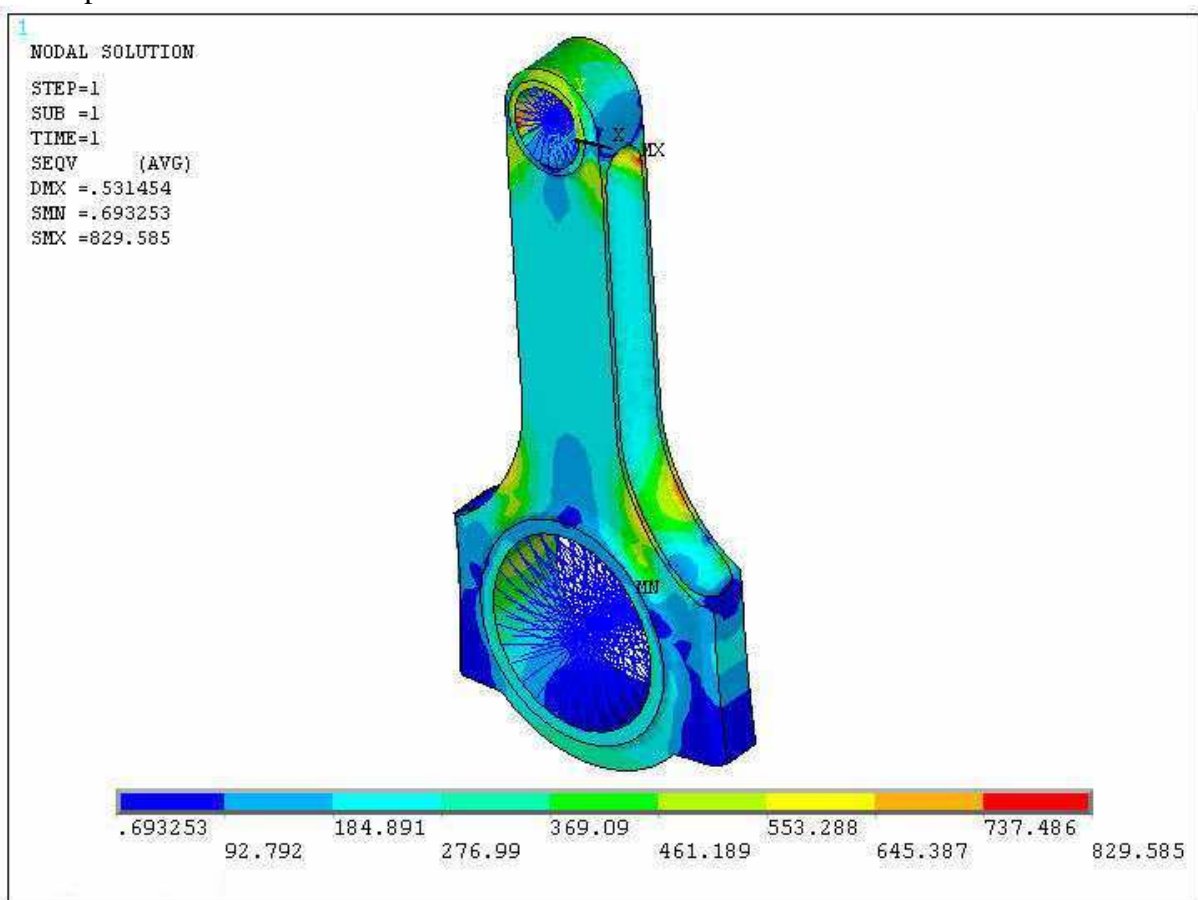
Na obrázku **6.51** je znázorněna analýza ojnice s parametry uvedenými v bodě e). Tuto ojnici porovnáme s ojnicemi předchozích parametrů $T = 15$ až 17 mm a $z = 1,5$ až $2,5 \text{ mm}$. Další parametr, který jsem uvedl je parametr h_L (hloubka drážky v dřívku ojnice směrem k ose ojnice). Tento parametr je zakótovaný v **obr.6.35** viz. kapitola 6.9.2. Tento parametr je rozdílný v tom, že na rozdíl od parametru tloušťky žebra dřívku ojnice z , který je stejný pro všechny ojnice pro $T = 15$ až 18 mm a postupně se mění po $0,5 \text{ mm}$, tento parametr se mění každé ojnice s tloušťkou T a příslušným parametrem z . Z toho plynou i následující výsledky.

Nejprve tuto ojnici porovnáme s ojnicí o $T = 15 \text{ mm}$, $z = 1,5 \text{ mm}$, $h_L = 6 \text{ mm}$. Redukovaná napětí v uzlech označených v předešlých kapitolách jako kritická místa, nejprve

v přechodu dříku ojnice do dolního oka ojnice, stoupla u ojnice s $T = 18$ mm téměř o 10,5%. Tento výsledek určitě ovlivňuje parametr h_L , který je u této ojnice o 1,5 mm větší. Lze tedy říci že u ojnice s tloušťkou 18 mm došlo ke zvýšení celkové tloušťky, ale naopak úpravou parametru h_L došlo k zeslabení dříku ojnice. Podobných výsledků redukovaného napětí bylo dosaženo i v uzlech tvořících přechod do horního oka.

Když tuto ojnici s tloušťkou $T = 18$ mm porovnáme s ojnicí o tloušťce $T = 16$ mm, tak tato redukovaná napětí dosahovala hodnot u ojnice s tloušťkou $T = 18$ mm hodnot větších o 8,8%. Tato procentuální hodnota musí být samozřejmě menší než tomu bylo v porovnání s ojnicí o $T = 15$ mm, neboť se parametr h_L lišil o 1 mm.

Zbývá tedy tuto ojnici porovnat s ojnicí o tloušťce $T = 17$ mm. U této ojnice se parametr h_L liší o 0,5 mm. Zde bylo v porovnání s touto ojnicí dosaženo hodnot větších asi o 3,3%. Což se dalo dopředu předpokládat, protože velikosti h_L se u obou ojnic liší jen 0,5 mm. Proto také menší procentuální rozdíl.

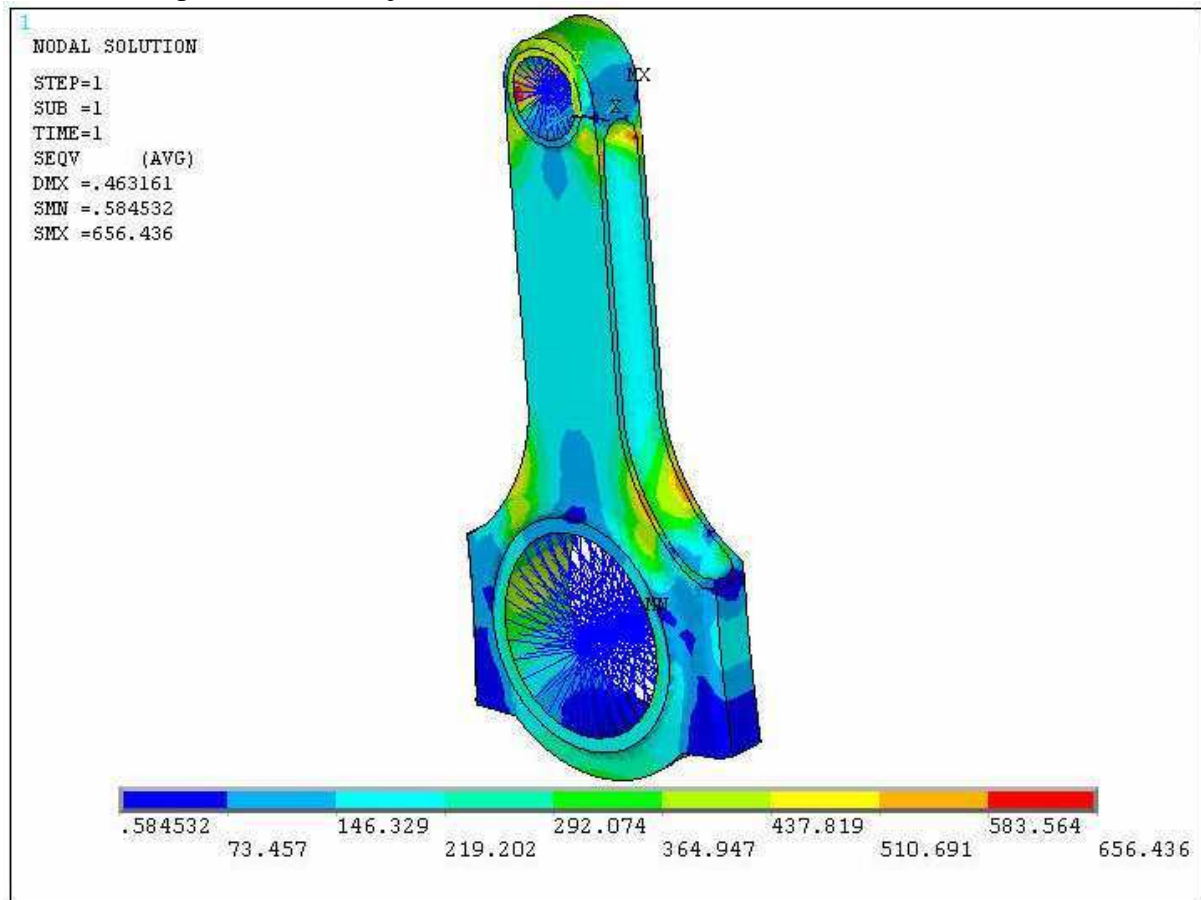


Obr.6.51 – Analýza ojnice s upravenou tloušťkou $T = 18$ mm a $z = 1,5$ mm

- h) $T = 18$ mm
 $z = 2$ mm
 $h_L = 7$ mm

U této ojnice byly opět parametry z a h_L zmenšeny o 0,5 mm. Jak to ovlivnilo konečný výsledek je vidět na obr.6.51. Postup porovnání této ojnice s předchozími bude totožný jako tomu bylo v předchozích kapitolách. Takže nejprve porovnání s ojnicí o $T = 15$ mm, $z = 2$ mm a $h_L = 5,5$ mm. Tento parametr je samozřejmě jako v předchozích kapitolách opět menší o 1,5 mm. Z výsledků je zřejmé, že je opět nárůst redukovaného napětí ve jmenovaných místech u

ojnice $T = 18$ o 1,7% oproti ojnici s $T = 15$ mm. Jak si můžeme všimnout, tak při porovnání předchozích ojníc s tloušťkami 15 a 18 mm a parametry $z = 1,5$ mm, je tento procentuální rozdíl menší. Dále tuto tyto výsledky porovnáme s výsledky pro ojnici o $T = 16$ mm. Parametry h_L se u této ojnice liší o 1 mm. V porovnání výsledků s touto ojnici naopak napětí u ojnice $T = 18$ mm klesla nepatrně a to asi o 1,58%, což je úplně jiný výsledek, než kterého jsme dosáhli při porovnání ojníc s $T = 15$ a 18 mm a parametru $z = 1,5$ mm. Tam byl větší nárůst u ojnice s tloušťkou $T = 18$ mm. Ve srovnání s ojnici o $T = 17$ mm, kde se parametry h_L liší o 0,5 mm došlo k poklesu redukovaného napětí ve výše zmíněných uzlech přibližně stejných hodnot a to asi 1,59%. Jako poslední tedy zbývá ověřit míru vlivu změny tloušťky žebra dřívku a parametru h_L u ojnice s $T = 18$ mm.

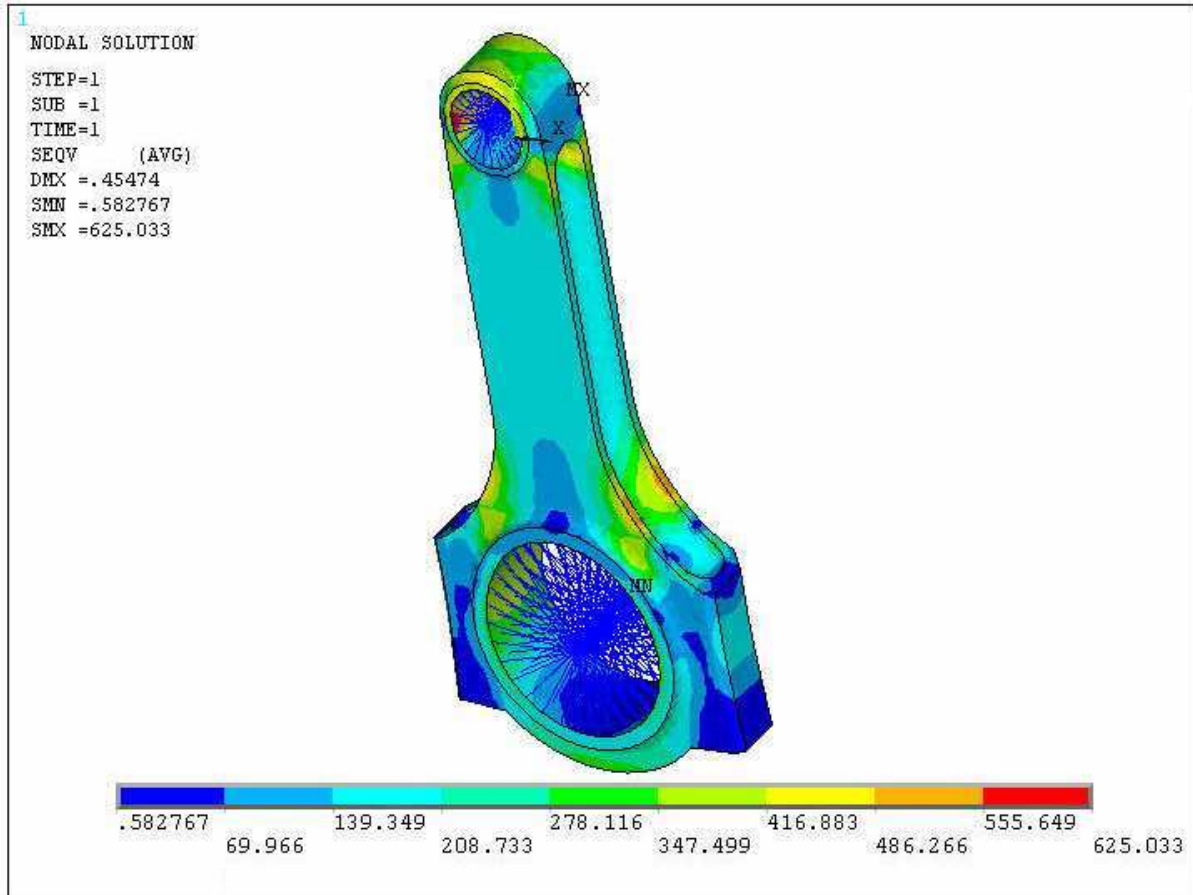


Obr.6.52 – Analýza ojnice s upravenou tloušťkou $T = 18$ mm a $z = 2$ mm

- i) $T = 18$ mm
 $z = 2,5$ mm
 $h_L = 6,5$ mm

Jako poslední ojnice, kterou zbývalo zanalyzovat, byla ojnice s parametry uvedenými v bodě i). Postup porovnání s předchozími verzemi ojníc bude obdobný jako v předchozích krocích. Takže nejprve bylo provedeno porovnání s ojnici o $T = 15$ mm, $z = 2,5$ mm a $h_L = 5$ mm. S výsledků je zřejmé že u ojnice s tloušťkou $T = 18$ mm došlo v uzlech uvedených míst k poklesu redukovaného napětí o 8,3%. Pro porovnání zbývají ještě ojnice o tloušťkách $T = 16$ a 17 mm. V porovnání s ojnici o tloušťce 16 mm a stejném parametru z došlo u tloušťky $T = 18$ mm k poklesu redukovaného napětí asi o 1,6%. Když tuto ojnici ($T = 18$ mm) ještě porovnáme s ojnici o $T = 17$ mm, tak zjistíme, že pokles redukovaných napětí ve vybraných

uzlech je vůči této ojnici větší o 1,8% než pokles v porovnání s předchozí ojnicí o tloušťce $T = 16$ mm, přesněji řečeno je 3,4%. Dal se ale očekávat pokles menší než 1,6%. Z toho závěru plyne, že tato výsledná hodnota mohla být ovlivněna opět parametrem h_L , který se neustále se zvyšující tloušťkou ojnice T zvětšoval a vlastně větším ubráním materiálu pro zvětšení tohoto parametru docházelo k zeslabení dřívku ojnice.



Obr.6.53 – Analýza ojnice s upravenou tloušťkou $T = 18$ mm a $z = 2,5$ mm

Závěrem lze k tloušťce a $T = 18$ mm říci že zvyšováním parametru z a naopak snižováním parametru h_L došlo ke zvýšení pevnosti ojnice. Toto platí pro porovnání parametrů z a h_L . Na druhé straně jsou i jiné výsledky a to zejména v porovnání s ojnicemi předchozích tloušťek. Všechny výhody a nevýhody všech analyzovaných verzí budou z hlediska pevnosti, hmotnosti podrobně vysvětleny v závěrečném hodnocení.

7. Zhodnocení získaných výsledků

Veškeré úkoly, zadané v této diplomové práci byly splněny. Byl proveden návrh a optimalizace ojnice motoru závodního automobilu. Byl vytvořen model ojnice s patřičnými rozměry vzhledem k požadovanému motoru a na požadované účely. Z hlediska konstrukce byl navržen model ojnice s profilem dřívku tvaru H. Výhody tohoto použití v tomto případě budou popsány.

U všech modelů ojnic, které byly analyzovány byly dodrženy parametry, které jsou uvedeny v kapitole (4.2 Parametry ojnice). Změna nastala jen ve 2.případech, kdy byla zvětšena délka ojnice L_{OJ} na 146 resp. 148 mm. V této práci byly potom následně vytvořeny modely ojnic o 4. různých tloušťkách T . Jednalo se o tloušťky **$T = 15, 16, 17$ a 18 mm**. Pro každou tuto tloušťku byly navíc postupně po kroku měněny další parametry ojnice a to: tloušťka žebra dřívku ojnice z a velikost vybrání drážky v dřívku ojnice h_L . Každý z těchto parametrů, které zde byly uvedeny do značné míry ovlivnil konečné výsledky.

Nejprve mezi budou porovnány ojnice o **$T = 15$ mm** a různými parametry z a h_L . Z výsledků vyplynulo, že když jsme porovnali ojnice s parametry z od 1,5 do 2,5 mm, tak nejmenších hodnot redukovaného napětí bylo dosaženo v uzlech označených jako kritická místa u ojnice s parametrem $z = 2,5$ mm. Z hlediska konečných výsledků zde byl určitý procentuální pokles napětí, který je určen v kapitole 6.9.1. Takže z hlediska pevnosti se ukázalo že ojnice s parametrem $z = 2,5$ mm je výhodnější. Na tento výsledek má samozřejmě vliv také parametr h_L , který byl u tohoto typu ojnice nejmenší. Dá se tedy říci, že nejmenší velikostí tohoto parametru došlo k nejmenšímu zeslabení dřívku ojnice.

Pro tuto tloušťku ještě byly provedena analýza ojnic pro různé délky L_{OJ} a to konkrétně pro délky 146 a ještě 148 mm. Následně byla posouzena míra vlivu změny délky ojnice při stejné tloušťce na výslednou pevnost. Výpočty bylo zjištěno, že při prvním zvětšení délky ojnice z 143 mm na 146 mm se hodnoty redukovaných napětí v označených místech lišily o 2,5%. Lze tedy říci, že zvětšením ojnice o 3 mm na tuto délku došlo k nárůstu redukovaných napětí o tuto hodnotu. Zvětšením ojnice ještě o další 2 mm na hodnotu 148 mm došlo k dalšímu nárůstu napětí téměř o 0,5%. K tomuto zjištění lze tedy říci, že zvětšením délky ojnice nedošlo ke zvýšení pevnosti této ojnice. Ke zlepšení by došlo zvětšením parametru T_{OJ} . Samozřejmě s touto konstrukční úpravou je spojen nárůst hmotnosti ojnice, což je pro ojnici, která je použita na již zmiňované účely nevýhodné. Řešením by bylo jedině použití dražšího materiálu o menší hustotě a větší pevnosti, ale zase by to mělo nevýhodu z hlediska ceny a nákladů kladených na výrobu této ojnice.

Dále byla zvětšena tloušťka **T** na 16 mm. Délka ojnice zůstala jako u výchozího modelu na hodnotě 143 mm. Tato hodnota platila i pro další analyzované modely. To Parametry z a h_L se měnily opět po kroku. Parametry z dosahovaly opět stejných hodnot jako v předchozím případě a budou i stejné pro další ojnice. Jediný rozdíl byl v parametru h_L , který byl pro tuto a následující tloušťky ojnic pro příslušný parametr z jiný než předchozí. Což se samozřejmě také projevilo ve výsledcích. Přesněji řečeno parametr h_L u byl u ojnice s $T = 15$ mm a $z = 1,5$ mm o 0,5 mm menší než u ojnice ze stejným parametrem a tloušťkou $T = 16$ mm. V porovnání ojnic s touto tloušťkou výsledky lépe vyzněly opět pro ojnici, která měla parametr $z = 2,5$ mm. U této ojnice došlo k poklesu redukovaného napětí v uzlech určených míst téměř o 12,5% vůči ojnici s parametrem $z = 1,5$ mm. Potom v porovnání ojnic o tloušťce $T = 15$ a 16 mm a parametry $z = 2,5$ mm, bylo zjištěno, že pokles redukovaného napětí byl u ojnice o tloušťce T

= 16 mm, jak již bylo řečeno asi 6,5%, i když parametr h_L , je u ojnice o tloušťce $T = 16$ mm o 0,5 mm větší. Dalo by se tedy říci, že došlo k zeslabení dřívku ojnice naproti tomu současně ke zvýšení celkové tloušťky ojnice, což se projevilo jako rozhodující faktor. Zvýšením tohoto parametru u ojnice o tloušťce $T = 16$ mm nedošlo ke snížení celkové pevnosti ojnice. Tloušťka ojnice měla tedy měla oproti tloušťce žebra dřívku ojnice z rozhodující vliv. Třeba v porovnání ojníc které měly stejnou tloušťku $T = 16$ a parametry $z = 2$ a 2,5 mm a parametry $h_L = 6$ a 5,5 byla redukována napětí v uzlech kontrolovaných míst nižší u ojnice s parametrem $z = 2,5$ a $h_L = 5,5$. Když ještě tuto tloušťku ojnice porovnáme ještě s tloušťkou ojnice 15 mm, tak tam procentuální rozdíl poklesu redukováného napětí z parametru $z = 2,5$ mm na 1,5 mm dosahoval až 30%. Kdežto u ojníc o $T = 16$ mm dosahoval pokles redukováného napětí při změně parametru $z = 2,5$ mm na 1,5 asi hodnot o 18%. Rozdíl poklesu redukováného napětí byl tedy u této tloušťky ojnice nižší. Konkrétně 12%. Takže z toho plyne, že se zvýšením celkové tloušťky ojnice z 15 na 16 mm, došlo k poklesu rozdílů redukováných napětí mezi parametry $z = 2,5$ a 1,5 mm pro tyto tloušťky.

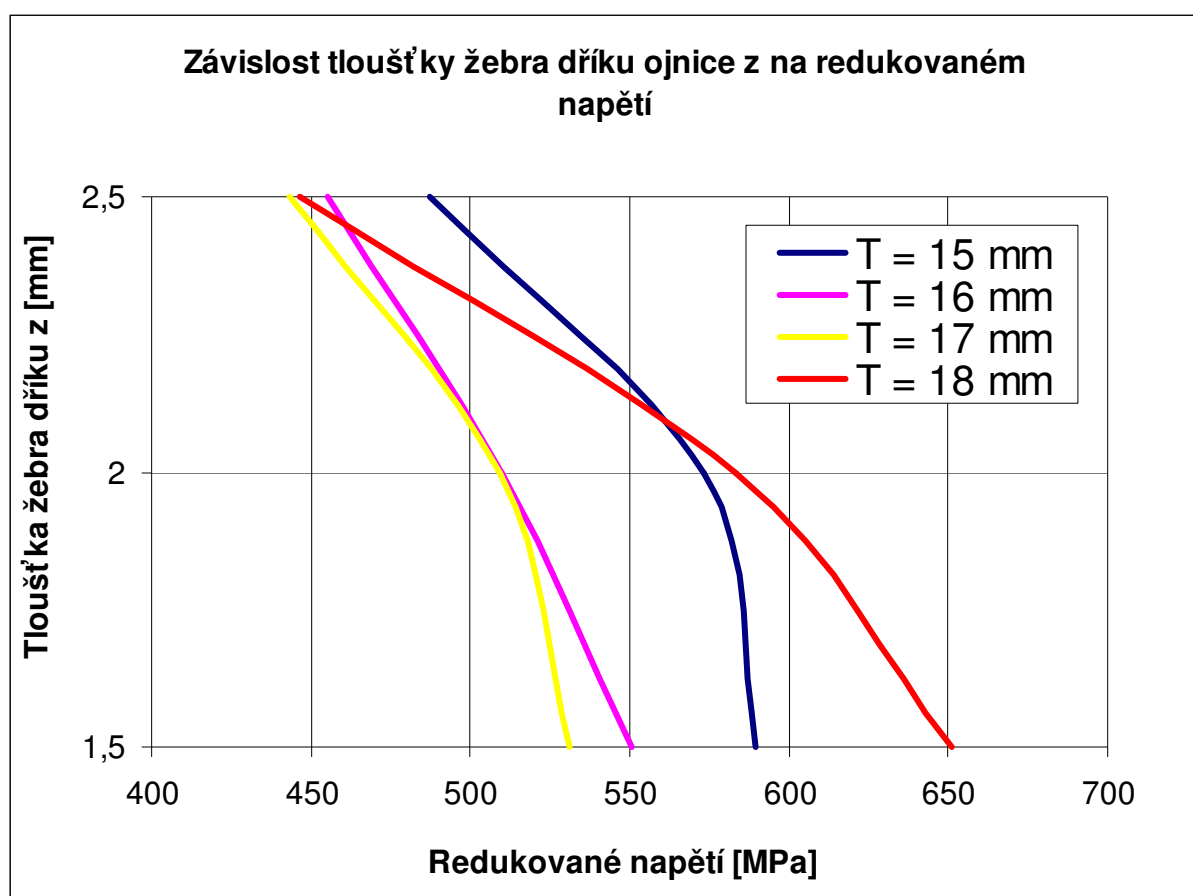
Tloušťka ojnice byla po té oproti výchozímu modelu zvýšena o 2 mm na 17 mm. Parametry ojníc z se měnily postupně po kroku 0,5 mm, jako tomu bylo u předchozích ojníc, ale parametry h_L se naopak od předchozích rovnic změnily. Ke každé tloušťce žebra dřívku ojnice již byl jiný parametr h_L . V každém kroku oproti předchozím tloušťkám 15 a 16 mm došlo ke zvětšení tohoto parametru. Hodnota této velikosti parametru byla pro $z = 1,5$ mm 7 mm, a pro $z = 2,5$ mm 6 mm. Z hlediska získaných výsledků byly redukována napětí v příslušných uzlech u této ojnice nižší u ojnice s parametrem $z = 2,5$ mm oproti $z = 1,5$ a to přibližně o 11 %. Jak je zřejmé z tohoto výsledku, tak je tento pokles redukováného napětí mezi těmito dvěma parametry o 1% menší než pokles u ojnice o tloušťce $T = 16$ mm. Zde je vidět, že dalším zvýšením tloušťky ojnice jsme dostali podobné výsledky jako u předchozí verze, i když zase došlo k zeslabení dřívku ojnice. (parametr h_L) se opět zvětšil.

Jako poslední byl zvětšen parametr T na 18 mm. Parametry z zůstávají stejné jako u všech předchozích řešení, ale zase se zvětšila maximální hodnota parametru h_L , která dosahovala pro $z = 1,5$ mm velikosti 7,5 mm což byl rozdíl oproti 1. verzi ojnice s tímto nejmenším parametrem u této ojnice 2,5 mm. (samozřejmě jsem neuváděl, že je to na každé straně dřívku ojnice, což je patrné z obrázku 6.35). Redukovaná napětí se v příslušných uzlech lišila pro parametry $z = 1,5$ mm a 2,5 mm o 24%, což je hodnota rozdílu větší než tomu bylo u ojníc s tloušťkami 16 a 17 mm, ale srovnatelná hodnota rozdílu s ojníc o tloušťce $T = 15$ mm, kde byl rozdíl mezi 22 až 30%. Tyto výsledky mohl u této ojnice ovlivnit parametr h_L , který zde byl největší, takže došlo k největšímu odebrání materiálu směrem k ose ojnice. Z toho závěru plyne, že v tomto případě by bylo nejvhodnější použití ojnice s tímto parametrem o menší velikosti, tedy 6,5 mm a $z = 2,5$ mm. Jak je také vidět ze všech výsledků, tak u této ojnice bylo dosaženo nejnižších hodnot redukováných napětí v uzlech, které jsme během celé pevnostní analýzy kontrolovali. Tato ojnice se jeví pro použití jako nejvýhodnější. Pro srovnání dosažených výsledků je na obrázku 6.54 zobrazen graf závislosti redukováného napětí na tloušťce žebra dřívku ojnice. Z výsledků je zřejmé, že nejnižších hodnot redukováných napětí v určených místech je pro ojnice s tloušťkou $T = 15, 16, 17, 18$ mm dosahováno při parametru $z = 2,5$ mm. Také rozdíly v redukováných napětích jsou u tohoto parametru pro ojnice $T = 16, 17, 18$ mm nejmenší.

Všechny tyto výpočty by bylo možné také ovlivnit tak, že by se kromě parametru z , který jsme u každé ojnice měnili ještě zároveň měnili parametr h_L po kroku a pro všechny tloušťky

ojnic by dosahoval stejných hodnot jako parametr z . Takže by ještě bylo více patrné s jakou mírou se tento parametr podílel na výsledné pevnosti ojnice.

Výsledky získané v této práci ovšem také nemusí odrážet realitu, jelikož prutové náhrady, které byly použity pro výpočet a spuštěny pomocí makra nemusejí být přesné. Samozřejmě to platí i pro velikosti průřezů prutových náhrad, kterým byly zjišťovány s ohledem na vymezení olejové vrstvy. Řešením by v tomto případě mohla být proměnná velikost tuhosti prutů, za použití největší tuhosti ve středech ok a směrem k okraji oka jejímu zmenšování. Analýzami ojnice bylo zjištěno že největší vliv na tuhost ojnice má tloušťka dříku ojnice a tloušťka žebra dříku ojnice. Když se dřík nebo žebro ztenčoval, tak výsledná napětí vycházela vyšší. Z těchto zjištění plyne závěr a výhoda použití ojnic s tvarem dříku H, který má z důvodu žebel nasměrovaných do směru kývavého pohybu mnohem vyšší tuhost než tvar dříku I.



6.54 – Grafická závislost redukovaných napětí na tloušťkách žebra dříku ojnice z

Seznam použité literatury

- [1] RAUSCHER, J., *Spalovací motory [online]*. 2005, [cit. 2007-10-01].
Dostupné z: <<http://www.ite.fme.vutbr.cz/opory/Spalovaci.motory.2005.pdf>>
- [2] RAUSCHER, J., *Vozidlové motory [online]*. Dostupné z:
<http://www.ite.fme.vutbr.cz/opory/vozidlove_motory/prednasky_ojnice.html>
- [3] KOŽOUŠEK, Josef., *Výpočet a konstrukce spalovacích motorů II*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983. 367 s.
- [4] RAUSCHER, J., *Ročníkový projekt: studijní opory*. VUT FSI Brno, 1996.
- [5] PÍŠTĚK, V., ŠTETINA, J. *Výpočetní metody ve stavbě spalovacích motorů*. Nakladatelství VUT v Brně, 1991
- [6] ANSYS Theory Reference. Release 10, ANSYS Inc., 2005
- [7] Ojnice Carrillo[online]. Dostupné z:
<<http://www.cp-carrillo.com/LinkClick.aspx?fileticket=0ZjqsBL%2b%2biI%3d&tabid=82>>
- [8] Obrázek opel [online]. Dostupné z:
<http://www.sbdev.co.uk/Case_Studies/CaseStudies_RoyWhite.htm>
- [9] Přehled sortimentu [online]. Dostupné z:
<http://www.praktis.sk/sk/product_belaz_pa-4.html>
- [10] Teorie motoru [online]. Dostupné z:
<<http://skoda.panda.cz/clanek.php3?id=397>>
- [11] Přehled sortimentu [online]. Dostupné z:
<<http://www.clarkmotorsport.net/cart/default.asp?pageid=25>>

Seznam použitých symbolů a jednotek

| | | |
|-----------|--|---------------------|
| a | Zrychlení pístu | $[\text{m.s}^{-2}]$ |
| a_x | Zrychlení pístu působící na ojnici ve vodorovném směru | $[\text{m.s}^{-2}]$ |
| a_y | Zrychlení pístu působící na ojnici ve vodorovném směru | $[\text{m.s}^{-2}]$ |
| D | Vrtání válce | $[\text{mm}]$ |
| D_0 | Průměr díry pro šroub | $[\text{mm}]$ |
| d_0 | Vnější průměr závitu šroubu | $[\text{mm}]$ |
| D_1 | Průměr hlavy šroubu | $[\text{mm}]$ |
| d_1 | Průměr na kterém působí třecí síla | $[\text{mm}]$ |
| d_2 | Průměr střední části dřívku šroubu | $[\text{mm}]$ |
| D_{d1} | Vnitřní průměr dolního oka ojnice | $[\text{mm}]$ |
| D_{d2} | Vnější průměr dolního oka ojnice | $[\text{mm}]$ |
| D_{h1} | Vnitřní průměr horního oka | $[\text{N}]$ |
| D_{h2} | Vnější průměr horního oka | $[\text{MPa}]$ |
| E | Modul pružnosti v tahu (tlaku) | $[\text{N}]$ |
| F_c | Celková síla od tlaku plynů | $[\text{N}]$ |
| F_d | Síla působící ve středu dolního oka při mom.rovnováze | $[\text{N}]$ |
| F_h | Síla působící ve středu horního oka při mom.rovnováze | $[\text{N}]$ |
| F_n | Normálová složka síly od tlaku plynů | $[\text{N}]$ |
| F_{OD} | Odstředivá redukovaná síla rotačních částí | $[\text{N}]$ |
| F_{oj} | Celková síla působící ve směru dřívku ojnice | $[\text{N}]$ |
| F_{oja} | Axiální síla od ojnice | $[\text{N}]$ |
| F_{ojr} | Radiální síla od ojnice | $[\text{N}]$ |
| F_p | Síla od tlaku plynů | $[\text{N}]$ |
| F_{pr} | Síla od předpětí | $[\text{N}]$ |
| F_Q | Osová síla | $[\text{N}]$ |
| F_r | Radiální síla | $[\text{N}]$ |
| F_S | Maximální síla namáhající ojnicí šroub na tah | $[\text{N}]$ |
| F_{SP} | Setrvačná síla posuvných částí pístní skupiny | $[\text{N}]$ |
| F_{SP1} | Setrvačná síla připadající na 1.šroub | $[\text{N}]$ |
| F_t | Tangenciální (tečná) síla | $[\text{N}]$ |
| $F_{tž}$ | Síla působící v těžišti při moment.rovnováze | $[\text{N}]$ |
| f_h | Součinitel tření pod hlavou šroubu | $[-]$ |
| f_z | Součinitel tření v závitu | $[-]$ |
| H_D | Šířka dolního oka ojnice | $[\text{mm}]$ |
| H_H | Šířka horního oka ojnice | $[\text{mm}]$ |
| h_L | Velikost vybrání drážky v dřívku ojnice | $[\text{mm}]$ |
| i | Počet ojnicích šroubů | $[-]$ |
| i_v | Počet válců | $[-]$ |
| K_O | Součinitel poddajnosti ojnice | $[\text{Pa}]$ |
| K_S | Součinitel poddajnosti ojnicího šroubu | $[\text{Pa}]$ |
| L_1 | Délka závitu dřívku ojnice | $[\text{mm}]$ |
| L_2 | Délka dřívku šroubu | $[\text{mm}]$ |
| L_{dt} | Vzdálenost těžiště od dolního oka ojnice | $[\text{mm}]$ |
| L_O | Délka otvoru pro ojnicí šroub | $[\text{mm}]$ |

| | | |
|------------------|--|------------------------|
| L_{OJ} | Délka ojnice | [mm] |
| m_1 | Hmotnost posuvných částí ojnice | [kg] |
| m_2 | Hmotnost rotačních částí ojnice | [kg] |
| m_{OJ} | Hmotnost ojnice | [kg] |
| m_P | Hmotnost pístní skupiny | [kg] |
| p | Tlak od plynů | [MPa] |
| p_a | Atmosférický tlak | [MPa] |
| P_e | Efektivní výkon motoru | [kW] |
| p_i | Indikovaný tlak oběhu motoru | [MPa] |
| p_z | Rozteč závitu šroubu | [-] |
| r_K | Poloměr zalomení klikového hřídele | [mm] |
| s | Dráha pístu | [mm] |
| S | Plocha pístu | [mm ²] |
| S_O | Plocha styku víka ojnice s tělesem ojnice | [mm ²] |
| S_1 | Průřez závitové části | [mm ²] |
| S_2 | Průřez dřívku šroubu | [mm ²] |
| S_D | Průřez prutu v dolním oku | [mm ²] |
| S_h | Průřez prutu v horním oku | [mm ²] |
| S_j | Plocha minimálního průřezu jádra šroubu | [mm ²] |
| S_s | Plocha minimálního průřezu dřívku šroubu | [mm ²] |
| T | Tloušťka dřívku ojnice | [mm] |
| T_{oj} | Šířka dřívku ojnice | [mm] |
| v | Rychlost pístu | [m/s] |
| V_i | Okamžitý objem nad pístem | [cm ³] |
| V_K | Kompresní objem | [cm ³] |
| V_Z | Zdvihový objem motoru | [cm ³] |
| x | Vzdálenost drážky dřívku ojnice osy v horním oku | [mm] |
| Z | Zdvih pístu | [mm] |
| z | Tloušťka žebra dřívku ojnice | [mm] |
| τ | Taktnost motoru | [-] |
| ε_K | Kompresní poměr | [-] |
| ω | Úhlová rychlost klikového hřídele | [rad.s ⁻¹] |
| ω_O | Úhlová rychlost výkyvu ojnice | [rad.s ⁻¹] |
| λ | Ojniční poměr | [-] |
| β | Úhel pootočení ojnice od osy válce | [°] |
| α | Úhel pootočení klikového hřídele | [°] |
| ε_O | Úhlové zrychlení výkyvu ojnice | [rad.s ⁻²] |
| μ | Poissonova konstanta | [-] |
| ρ | Hustota materiálu | [t/mm ³] |
| φ_Z | Úhel stoupání závitu | [°] |
| σ_T | Tahové napětí ve střední části dřívku šroubu | [MPa] |
| σ_{MAX} | Max.napětí v nejmenším průřezu dřívku šroubu | [MPa] |
| σ_{MIN} | Min.napětí v nejmenším průřezu dřívku šroubu | [MPa] |
| σ_{MAX}^Z | Max.napětí v jádru závitu | [MPa] |
| σ_{MIN}^Z | Min.napětí v jádru závitu | [MPa] |
| σ_m | Střední napětí cyklu | [MPa] |

| | | |
|----------------|---|-------|
| σ_a | Rozkmit napětí | [MPa] |
| σ_a' | Napětí na vnějším vlákne | [MPa] |
| σ_i' | Napětí na vnitřním vlákne | [MPa] |
| χ | Součinitel v případě spojení víka s tělesem oj.šrouby | [-] |
| K_σ | Součinitel koncentrace napětí | [-] |
| ξ_σ' | Součinitel absolutní velikosti | [-] |
| ξ_σ'' | Součinitel opracování povrchu | [-] |



Seznam příloh

Příloha č.1 Hodnoty zatížení zadávané do ANSYSU

Příloha č.2 CD-ROM

Přílohy na CD:

[Příloha_1] Modely ojnic v CAD systému ProEngineer

[Příloha_2] Indikované tlaky ve válci

Přílohy

Příloha č.1 – Hodnoty zatížení zadávané do ANSYSU

| Úhel natočení klikového hřídele α [°] | Zrychlení v ose x a_x [m.s ⁻²] | Zrychlení v ose y a_y [m.s ⁻²] | Síla působící v ose ojnice F_{oj} [N] | Úhlové zrychlení kolem osy z ε_0 [rad.s ⁻²] | Úhlová rychlost kolem osy z ω_0 [rad.s ⁻²] |
|--|--|--|---|---|---|
| 0 | 0 | 28367,46 | -18625,8 | 0 | 214,3403 |
| 2 | 297,6855 | 28336,62 | -18566,9 | -5326,73 | 214,2097 |
| 4 | 593,1666 | 28244,24 | -18454,3 | -10647 | 213,8182 |
| 6 | 884,2566 | 28090,68 | -18316,9 | -15954,2 | 213,1661 |
| 8 | 1168,804 | 27876,52 | -18161 | -21242,1 | 212,2543 |
| 10 | 1444,711 | 27602,61 | -17992,6 | -26504 | 211,084 |
| 12 | 1709,948 | 27270,01 | -17794,8 | -31733,7 | 209,6564 |
| 14 | 1962,571 | 26880 | -17556,3 | -36924,6 | 207,9735 |
| 16 | 2200,738 | 26434,06 | -17301 | -42070,7 | 206,0371 |
| 18 | 2422,723 | 25933,92 | -17012,3 | -47165,4 | 203,8497 |
| 20 | 2626,928 | 25381,44 | -16638,2 | -52202,7 | 201,414 |
| 22 | 2811,895 | 24778,71 | -16226,2 | -57176,4 | 198,7329 |
| 24 | 2976,321 | 24127,96 | -15800,6 | -62080,4 | 195,8096 |
| 26 | 3119,063 | 23431,59 | -15374,3 | -66908,8 | 192,6478 |
| 28 | 3239,149 | 22692,12 | -14919,1 | -71655,6 | 189,2512 |
| 30 | 3335,783 | 21912,22 | -14436,2 | -76315,2 | 185,6241 |
| 32 | 3408,352 | 21094,64 | -13926,8 | -80881,8 | 181,7709 |
| 34 | 3456,426 | 20242,23 | -13392,2 | -85349,9 | 177,6962 |
| 36 | 3479,764 | 19357,93 | -12834 | -89713,9 | 173,4049 |
| 38 | 3478,312 | 18444,71 | -12253,6 | -93968,7 | 168,9025 |
| 40 | 3452,203 | 17505,62 | -11652,4 | -98109 | 164,1942 |
| 42 | 3401,75 | 16543,7 | -11073,8 | -102130 | 159,2859 |
| 44 | 3327,448 | 15562,03 | -10394,7 | -106026 | 154,1835 |
| 46 | 3229,961 | 14563,65 | -9741,45 | -109793 | 148,8933 |
| 48 | 3110,122 | 13551,62 | -9074,36 | -113427 | 143,4217 |
| 50 | 2968,915 | 12528,93 | -8395,23 | -116922 | 137,7753 |
| 52 | 2807,476 | 11498,56 | -7723,87 | -120274 | 131,9611 |
| 54 | 2627,07 | 10463,41 | -7026,31 | -123481 | 125,9861 |
| 56 | 2429,088 | 9426,304 | -6322,39 | -126536 | 119,8576 |
| 58 | 2215,032 | 8389,998 | -5614,06 | -129438 | 113,5831 |
| 60 | 1986,495 | 7357,152 | -4903,24 | -132182 | 107,1701 |
| 62 | 1745,155 | 6330,329 | -4191,91 | -134765 | 100,6267 |
| 64 | 1492,754 | 5311,985 | -3481,98 | -137183 | 93,9606 |
| 66 | 1231,087 | 4304,463 | -2775,39 | -139435 | 87,18005 |
| 68 | 961,9821 | 3309,99 | -2074,03 | -141516 | 80,29329 |
| 70 | 687,2892 | 2330,668 | -1379,76 | -143426 | 73,3087 |
| 72 | 408,8616 | 1368,475 | -694,396 | -145160 | 66,23479 |

| | | | | | |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 74 | 128,5424 | 425,2583 | -19,699 | -146718 | 59,08019 |
| 76 | -151,851 | -497,263 | 642,637 | -148097 | 51,85361 |
| 78 | -430,54 | -1397,5 | 1290,989 | -149295 | 44,56385 |
| 80 | -705,799 | -2274,01 | 1923,818 | -150312 | 37,2198 |
| 82 | -975,969 | -3125,45 | 2539,673 | -151145 | 29,8304 |
| 84 | -1239,47 | -3950,64 | 3137,203 | -151794 | 22,40466 |
| 86 | -1494,8 | -4748,52 | 3715,164 | -152259 | 14,95162 |
| 88 | -1740,57 | -5518,16 | 4272,421 | -152537 | 7,480368 |
| 90 | -1975,5 | -6258,74 | 4807,959 | -152630 | 0,0 |
| 92 | -2198,39 | -6969,59 | 5320,886 | -152537 | -7,48037 |
| 94 | -2408,21 | -7650,14 | 5810,436 | -152259 | -14,9516 |
| 96 | -2604,01 | -8299,96 | 6275,974 | -151794 | -22,4047 |
| 98 | -2785,01 | -8918,73 | 6716,995 | -151145 | -29,8304 |
| 100 | -2950,51 | -9506,23 | 7133,127 | -150312 | -37,2198 |
| 102 | -3100 | -10062,4 | 7524,131 | -149295 | -44,5639 |
| 104 | -3233,04 | -10587,2 | 7889,899 | -148097 | -51,8536 |
| 106 | -3349,38 | -11080,8 | 8230,451 | -146718 | -59,0802 |
| 108 | -3448,84 | -11543,4 | 8545,934 | -145160 | -66,2348 |
| 110 | -3531,4 | -11975,3 | 8836,617 | -143426 | -73,3087 |
| 112 | -3597,14 | -12377 | 9102,883 | -141516 | -80,2933 |
| 114 | -3646,25 | -12749 | 9345,229 | -139435 | -87,1801 |
| 116 | -3679,05 | -13091,9 | 9564,254 | -137183 | -93,9606 |
| 118 | -3695,91 | -13406,4 | 9784,759 | -134765 | -100,627 |
| 120 | -3697,32 | -13693,4 | 9935,223 | -132182 | -107,17 |
| 122 | -3683,85 | -13953,5 | 10088,82 | -129438 | -113,583 |
| 124 | -3656,12 | -14187,9 | 10222,4 | -126536 | -119,858 |
| 126 | -3614,82 | -14397,5 | 10336,95 | -123481 | -125,986 |
| 128 | -3560,68 | -14583,5 | 10433,56 | -120274 | -131,961 |
| 130 | -3494,49 | -14746,9 | 10513,31 | -116922 | -137,775 |
| 132 | -3417,03 | -14888,9 | 10547,57 | -113427 | -143,422 |
| 134 | -3329,15 | -15010,9 | 10626,9 | -109793 | -148,893 |
| 136 | -3231,66 | -15114,1 | 10663,11 | -106026 | -154,184 |
| 138 | -3125,41 | -15199,8 | 10675,34 | -102130 | -159,286 |
| 140 | -3011,2 | -15269,3 | 10694,46 | -98109 | -164,194 |
| 142 | -2889,84 | -15324,2 | 10703,88 | -93968,7 | -168,902 |
| 144 | -2762,12 | -15365,7 | 10698,87 | -89713,9 | -173,405 |
| 146 | -2628,78 | -15395,2 | 10686,54 | -85349,9 | -177,696 |
| 148 | -2490,53 | -15414,2 | 10668,04 | -80881,8 | -181,771 |
| 150 | -2348,04 | -15423,9 | 10644,49 | -76315,2 | -185,624 |
| 152 | -2201,91 | -15425,7 | 10616,97 | -71655,6 | -189,251 |
| 154 | -2052,74 | -15420,9 | 10586,51 | -66908,8 | -192,648 |
| 156 | -1901,02 | -15410,9 | 10554,11 | -62080,4 | -195,81 |
| 158 | -1747,22 | -15396,7 | 10520,68 | -57176,4 | -198,733 |
| 160 | -1591,76 | -15379,6 | 10487,11 | -52202,7 | -201,414 |

| | | | | | |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 162 | -1434,98 | -15360,6 | 10454,21 | -47165,4 | -203,85 |
| 164 | -1277,18 | -15340,8 | 10422,72 | -42070,7 | -206,037 |
| 166 | -1118,62 | -15321 | 10393,31 | -36924,6 | -207,973 |
| 168 | -959,509 | -15302,1 | 10366,58 | -31733,7 | -209,656 |
| 170 | -800,004 | -15284,9 | 10343,06 | -26504 | -211,084 |
| 172 | -640,234 | -15269,9 | 10294,13 | -21242,1 | -212,254 |
| 174 | -480,29 | -15257,7 | 10243,44 | -15954,2 | -213,166 |
| 176 | -320,242 | -15248,6 | 10231,94 | -10647 | -213,818 |
| 178 | -160,134 | -15243,1 | 10137,82 | -5326,73 | -214,21 |
| 180 | 0,0 | -15241,2 | 10129,67 | 0,0 | -214,34 |
| 182 | 160,1338 | -15243,1 | 10132,01 | 5326,725 | -214,21 |
| 184 | 320,2416 | -15248,6 | 10127,36 | 10646,96 | -213,818 |
| 186 | 480,2904 | -15257,7 | 10045,84 | 15954,23 | -213,166 |
| 188 | 640,2337 | -15269,9 | 10015,06 | 21242,05 | -212,254 |
| 190 | 800,0044 | -15284,9 | 10034,76 | 26504 | -211,084 |
| 192 | 959,5091 | -15302,1 | 10058,1 | 31733,65 | -209,656 |
| 194 | 1118,622 | -15321 | 10084,61 | 36924,64 | -207,973 |
| 196 | 1277,179 | -15340,8 | 10113,78 | 42070,65 | -206,037 |
| 198 | 1434,975 | -15360,6 | 10144,99 | 47165,4 | -203,85 |
| 200 | 1591,757 | -15379,6 | 10177,59 | 52202,68 | -201,414 |
| 202 | 1747,224 | -15396,7 | 10240,06 | 57176,37 | -198,733 |
| 204 | 1901,019 | -15410,9 | 10261,46 | 62080,39 | -195,81 |
| 206 | 2052,737 | -15420,9 | 10275,92 | 66908,78 | -192,648 |
| 208 | 2201,915 | -15425,7 | 10305,97 | 71655,65 | -189,251 |
| 210 | 2348,036 | -15423,9 | 10333,07 | 76315,22 | -185,624 |
| 212 | 2490,531 | -15414,2 | 10356,17 | 80881,81 | -181,771 |
| 214 | 2628,783 | -15395,2 | 10374,21 | 85349,86 | -177,696 |
| 216 | 2762,123 | -15365,7 | 10386,06 | 89713,92 | -173,405 |
| 218 | 2889,844 | -15324,2 | 10390,57 | 93968,68 | -168,902 |
| 220 | 3011,198 | -15269,3 | 10386,58 | 98108,95 | -164,194 |
| 222 | 3125,405 | -15199,8 | 10372,88 | 102129,7 | -159,286 |
| 224 | 3231,663 | -15114,1 | 10348,27 | 106026 | -154,184 |
| 226 | 3329,149 | -15010,9 | 10311,54 | 109793,1 | -148,893 |
| 228 | 3417,034 | -14888,9 | 10261,48 | 113426,5 | -143,422 |
| 230 | 3494,485 | -14746,9 | 10196,91 | 116921,7 | -137,775 |
| 232 | 3560,681 | -14583,5 | 10296,02 | 120274,4 | -131,961 |
| 234 | 3614,818 | -14397,5 | 10342,94 | 123480,6 | -125,986 |
| 236 | 3656,12 | -14187,9 | 10288,38 | 126536,4 | -119,858 |
| 238 | 3683,851 | -13953,5 | 10257,05 | 129438 | -113,583 |
| 240 | 3697,324 | -13693,4 | 10127,77 | 132181,8 | -107,17 |
| 242 | 3695,909 | -13406,4 | 9959,505 | 134764,7 | -100,627 |
| 244 | 3679,046 | -13091,9 | 9799,581 | 137183,3 | -93,9606 |
| 246 | 3646,254 | -12749 | 9671,492 | 139434,8 | -87,1801 |
| 248 | 3597,136 | -12377 | 9496,091 | 141516,5 | -80,2933 |

| | | | | | |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 250 | 3531,396 | -11975,3 | 9260,559 | 143425,7 | -73,3087 |
| 252 | 3448,837 | -11543,4 | 9024,89 | 145160,2 | -66,2348 |
| 254 | 3349,375 | -11080,8 | 8715,937 | 146717,8 | -59,0802 |
| 256 | 3233,044 | -10587,2 | 8381,878 | 148096,7 | -51,8536 |
| 258 | 3099,996 | -10062,4 | 8016,483 | 149295,1 | -44,5639 |
| 260 | 2950,514 | -9506,23 | 7625,799 | 150311,6 | -37,2198 |
| 262 | 2785,007 | -8918,73 | 7209,931 | 151145 | -29,8304 |
| 264 | 2604,014 | -8299,96 | 6817,822 | 151794,3 | -22,4047 |
| 266 | 2408,209 | -7650,14 | 6352,448 | 152258,6 | -14,9516 |
| 268 | 2198,393 | -6969,59 | 5869,087 | 152537,5 | -7,48037 |
| 270 | 1975,496 | -6258,74 | 5423,2 | 152630,4 | -3,9E-14 |
| 272 | 1740,573 | -5518,16 | 4930,262 | 152537,5 | 7,480368 |
| 274 | 1494,801 | -4748,52 | 4445,966 | 152258,6 | 14,95162 |
| 276 | 1239,467 | -3950,64 | 4007,814 | 151794,3 | 22,40466 |
| 278 | 975,9688 | -3125,45 | 3568,144 | 151145 | 29,8304 |
| 280 | 705,7988 | -2274,01 | 3456,575 | 150311,6 | 37,2198 |
| 282 | 430,5396 | -1397,5 | 2464,125 | 149295,1 | 44,56385 |
| 284 | 151,8508 | -497,263 | 1948,508 | 148096,7 | 51,85361 |
| 286 | -128,542 | 425,2583 | 1424,622 | 146717,8 | 59,08019 |
| 288 | -408,862 | 1368,475 | 887,9755 | 145160,2 | 66,23479 |
| 290 | -687,289 | 2330,668 | 521,9219 | 143425,7 | 73,3087 |
| 292 | -961,982 | 3309,99 | -35,3947 | 141516,5 | 80,29329 |
| 294 | -1231,09 | 4304,463 | -600,3 | 139434,8 | 87,18005 |
| 296 | -1492,75 | 5311,985 | -983,899 | 137183,3 | 93,9606 |
| 298 | -1745,15 | 6330,329 | -1558,67 | 134764,7 | 100,6267 |
| 300 | -1986,49 | 7357,152 | -1978,97 | 132181,8 | 107,1701 |
| 302 | -2215,03 | 8389,998 | -2555,97 | 129438 | 113,5831 |
| 304 | -2429,09 | 9426,304 | -2831,11 | 126536,4 | 119,8576 |
| 306 | -2627,07 | 10463,41 | -3247,07 | 123480,6 | 125,9861 |
| 308 | -2807,48 | 11498,56 | -3514,2 | 120274,4 | 131,9611 |
| 310 | -2968,92 | 12528,93 | -3935,74 | 116921,7 | 137,7753 |
| 312 | -3110,12 | 13551,62 | -4169,27 | 113426,5 | 143,4217 |
| 314 | -3229,96 | 14563,65 | -4410,12 | 109793,1 | 148,8933 |
| 316 | -3327,45 | 15562,03 | -4484,07 | 106026 | 154,1835 |
| 318 | -3401,75 | 16543,7 | -4562,03 | 102129,7 | 159,2859 |
| 320 | -3452,2 | 17505,62 | -4470,4 | 98108,95 | 164,1942 |
| 322 | -3478,31 | 18444,71 | -4657,43 | 93968,68 | 168,9025 |
| 324 | -3479,76 | 19357,93 | -4394 | 89713,92 | 173,4049 |
| 326 | -3456,43 | 20242,23 | -4375,84 | 85349,86 | 177,6962 |
| 328 | -3408,35 | 21094,64 | -4046,97 | 80881,81 | 181,7709 |
| 330 | -3335,78 | 21912,22 | -3583,33 | 76315,22 | 185,6241 |
| 332 | -3239,15 | 22692,12 | -3071,85 | 71655,65 | 189,2512 |
| 334 | -3119,06 | 23431,59 | -2557,98 | 66908,78 | 192,6478 |
| 336 | -2976,32 | 24127,96 | -1999,19 | 62080,39 | 195,8096 |

| | | | | | |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 338 | -2811,89 | 24778,71 | -1405,84 | 57176,37 | 198,7329 |
| 340 | -2626,93 | 25381,44 | -513,829 | 52202,68 | 201,414 |
| 342 | -2422,72 | 25933,92 | 560,6386 | 47165,4 | 203,8497 |
| 344 | -2200,74 | 26434,06 | 1672,685 | 42070,65 | 206,0371 |
| 346 | -1962,57 | 26880 | 3079,803 | 36924,64 | 207,9735 |
| 348 | -1709,95 | 27270,01 | 4811,7 | 31733,65 | 209,6564 |
| 350 | -1444,71 | 27602,61 | 8154,558 | 26504 | 211,084 |
| 352 | -1168,8 | 27876,52 | 11799,06 | 21242,05 | 212,2543 |
| 354 | -884,257 | 28090,68 | 16478,77 | 15954,23 | 213,1661 |
| 356 | -593,167 | 28244,24 | 22746,45 | 10646,96 | 213,8182 |
| 358 | -297,686 | 28336,62 | 29493,58 | 5326,725 | 214,2097 |
| 360 | 0,0 | 28367,46 | 38813,59 | 0,0 | 214,3403 |
| 362 | 297,6855 | 28336,62 | 47043,53 | -5326,73 | 214,2097 |
| 364 | 593,1666 | 28244,24 | 53192,32 | -10647 | 213,8182 |
| 366 | 884,2566 | 28090,68 | 57696,6 | -15954,2 | 213,1661 |
| 368 | 1168,804 | 27876,52 | 61980,58 | -21242,1 | 212,2543 |
| 370 | 1444,711 | 27602,61 | 61583,26 | -26504 | 211,084 |
| 372 | 1709,948 | 27270,01 | 59564,29 | -31733,7 | 209,6564 |
| 374 | 1962,571 | 26880 | 56892,01 | -36924,6 | 207,9735 |
| 376 | 2200,738 | 26434,06 | 53831,44 | -42070,7 | 206,0371 |
| 378 | 2422,723 | 25933,92 | 49918,76 | -47165,4 | 203,8497 |
| 380 | 2626,928 | 25381,44 | 47240,09 | -52202,7 | 201,414 |
| 382 | 2811,895 | 24778,71 | 43388,38 | -57176,4 | 198,7329 |
| 384 | 2976,321 | 24127,96 | 40095,8 | -62080,4 | 195,8096 |
| 386 | 3119,063 | 23431,59 | 37297,51 | -66908,8 | 192,6478 |
| 388 | 3239,149 | 22692,12 | 34558,88 | -71655,6 | 189,2512 |
| 390 | 3335,783 | 21912,22 | 31372,56 | -76315,2 | 185,6241 |
| 392 | 3408,352 | 21094,64 | 29381,95 | -80881,8 | 181,7709 |
| 394 | 3456,426 | 20242,23 | 26804,43 | -85349,9 | 177,6962 |
| 396 | 3479,764 | 19357,93 | 24378,77 | -89713,9 | 173,4049 |
| 398 | 3478,312 | 18444,71 | 23155,66 | -93968,7 | 168,9025 |
| 400 | 3452,203 | 17505,62 | 21202,52 | -98109 | 164,1942 |
| 402 | 3401,75 | 16543,7 | 19729,43 | -102130 | 159,2859 |
| 404 | 3327,448 | 15562,03 | 18243,54 | -106026 | 154,1835 |
| 406 | 3229,961 | 14563,65 | 35324,99 | -109793 | 148,8933 |
| 408 | 3110,122 | 13551,62 | 16172,28 | -113427 | 143,4217 |
| 410 | 2968,915 | 12528,93 | 15454,38 | -116922 | 137,7753 |
| 412 | 2807,476 | 11498,56 | 14849,28 | -120274 | 131,9611 |
| 414 | 2627,07 | 10463,41 | 15613,22 | -123481 | 125,9861 |
| 416 | 2429,088 | 9426,304 | 13845,49 | -126536 | 119,8576 |
| 418 | 2215,032 | 8389,998 | 13689,76 | -129438 | 113,5831 |
| 420 | 1986,495 | 7357,152 | 13256,14 | -132182 | 107,1701 |
| 422 | 1745,155 | 6330,329 | 12818,65 | -134765 | 100,6267 |
| 424 | 1492,754 | 5311,985 | 12827,95 | -137183 | 93,9606 |

| | | | | | |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 426 | 1231,087 | 4304,463 | 12685,86 | -139435 | 87,18005 |
| 428 | 961,9821 | 3309,99 | 12504,92 | -141516 | 80,29329 |
| 430 | 687,2892 | 2330,668 | 12628,49 | -143426 | 73,3087 |
| 432 | 408,8616 | 1368,475 | 12425,35 | -145160 | 66,23479 |
| 434 | 128,5424 | 425,2583 | 12833,54 | -146718 | 59,08019 |
| 436 | -151,851 | -497,263 | 12778,12 | -148097 | 51,85361 |
| 438 | -430,54 | -1397,5 | 12839,99 | -149295 | 44,56385 |
| 440 | -705,799 | -2274,01 | 13030,22 | -150312 | 37,2198 |
| 442 | -975,969 | -3125,45 | 13372,09 | -151145 | 29,8304 |
| 444 | -1239,47 | -3950,64 | 13517,56 | -151794 | 22,40466 |
| 446 | -1494,8 | -4748,52 | 13647,99 | -152259 | 14,95162 |
| 448 | -1740,57 | -5518,16 | 13750,22 | -152537 | 7,480368 |
| 450 | -1975,5 | -6258,74 | 13975,66 | -152630 | 6,56E-14 |
| 452 | -2198,39 | -6969,59 | 14067,75 | -152537 | -7,48037 |
| 454 | -2408,21 | -7650,14 | 14275,57 | -152259 | -14,9516 |
| 456 | -2604,01 | -8299,96 | 14421,97 | -151794 | -22,4047 |
| 458 | -2785,01 | -8918,73 | 14719,6 | -151145 | -29,8304 |
| 460 | -2950,51 | -9506,23 | 14857,74 | -150312 | -37,2198 |
| 462 | -3100 | -10062,4 | 14927,65 | -149295 | -44,5639 |
| 464 | -3233,04 | -10587,2 | 15111,67 | -148097 | -51,8536 |
| 466 | -3349,38 | -11080,8 | 15166,83 | -146718 | -59,0802 |
| 468 | -3448,84 | -11543,4 | 15342,25 | -145160 | -66,2348 |
| 470 | -3531,4 | -11975,3 | 15450,11 | -143426 | -73,3087 |
| 472 | -3597,14 | -12377 | 15430,51 | -141516 | -80,2933 |
| 474 | -3646,25 | -12749 | 15526,1 | -139435 | -87,1801 |
| 476 | -3679,05 | -13091,9 | 15562,06 | -137183 | -93,9606 |
| 478 | -3695,91 | -13406,4 | 15509,18 | -134765 | -100,627 |
| 480 | -3697,32 | -13693,4 | 15669,45 | -132182 | -107,17 |
| 482 | -3683,85 | -13953,5 | 15514,08 | -129438 | -113,583 |
| 484 | -3656,12 | -14187,9 | 15501,32 | -126536 | -119,858 |
| 486 | -3614,82 | -14397,5 | 15433,84 | -123481 | -125,986 |
| 488 | -3560,68 | -14583,5 | 15348,82 | -120274 | -131,961 |
| 490 | -3494,49 | -14746,9 | 15169,81 | -116922 | -137,775 |
| 492 | -3417,03 | -14888,9 | 15101,02 | -113427 | -143,422 |
| 494 | -3329,15 | -15010,9 | 14976,46 | -109793 | -148,893 |
| 496 | -3231,66 | -15114,1 | 14868,84 | -106026 | -154,184 |
| 498 | -3125,41 | -15199,8 | 14749,61 | -102130 | -159,286 |
| 500 | -3011,2 | -15269,3 | 14584,48 | -98109 | -164,194 |
| 502 | -2889,84 | -15324,2 | 14309,82 | -93968,7 | -168,902 |
| 504 | -2762,12 | -15365,7 | 13998,15 | -89713,9 | -173,405 |
| 506 | -2628,78 | -15395,2 | 13809,87 | -85349,9 | -177,696 |
| 508 | -2490,53 | -15414,2 | 13651,4 | -80881,8 | -181,771 |
| 510 | -2348,04 | -15423,9 | 13488,44 | -76315,2 | -185,624 |
| 512 | -2201,91 | -15425,7 | 13322,06 | -71655,6 | -189,251 |

| | | | | | |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 514 | -2052,74 | -15420,9 | 13018,51 | -66908,8 | -192,648 |
| 516 | -1901,02 | -15410,9 | 12983,11 | -62080,4 | -195,81 |
| 518 | -1747,22 | -15396,7 | 12882,58 | -57176,4 | -198,733 |
| 520 | -1591,76 | -15379,6 | 12823,13 | -52202,7 | -201,414 |
| 522 | -1434,98 | -15360,6 | 12752,92 | -47165,4 | -203,85 |
| 524 | -1277,18 | -15340,8 | 12637,78 | -42070,7 | -206,037 |
| 526 | -1118,62 | -15321 | 12519,24 | -36924,6 | -207,973 |
| 528 | -959,509 | -15302,1 | 12415,36 | -31733,7 | -209,656 |
| 530 | -800,004 | -15284,9 | 12268,47 | -26504 | -211,084 |
| 532 | -640,234 | -15269,9 | 11980,22 | -21242,1 | -212,254 |
| 534 | -480,29 | -15257,7 | 11783,59 | -15954,2 | -213,166 |
| 536 | -320,242 | -15248,6 | 11696,13 | -10647 | -213,818 |
| 538 | -160,134 | -15243,1 | 11566,91 | -5326,73 | -214,21 |
| 540 | 0,0 | -15241,2 | 11535,45 | 0,0 | -214,34 |
| 542 | 160,1338 | -15243,1 | 11473,96 | 5326,725 | -214,21 |
| 544 | 320,2416 | -15248,6 | 11324,27 | 10646,96 | -213,818 |
| 546 | 480,2904 | -15257,7 | 11219,84 | 15954,23 | -213,166 |
| 548 | 640,2337 | -15269,9 | 11741,84 | 21242,05 | -212,254 |
| 550 | 800,0044 | -15284,9 | 11756,58 | 26504 | -211,084 |
| 552 | 959,5091 | -15302,1 | 11169,8 | 31733,65 | -209,656 |
| 554 | 1118,622 | -15321 | 11127,19 | 36924,64 | -207,973 |
| 556 | 1277,179 | -15340,8 | 11122,21 | 42070,65 | -206,037 |
| 558 | 1434,975 | -15360,6 | 11154,33 | 47165,4 | -203,85 |
| 560 | 1591,757 | -15379,6 | 11187,92 | 52202,68 | -201,414 |
| 562 | 1747,224 | -15396,7 | 11222,24 | 57176,37 | -198,733 |
| 564 | 1901,019 | -15410,9 | 11256,47 | 62080,39 | -195,81 |
| 566 | 2052,737 | -15420,9 | 11289,74 | 66908,78 | -192,648 |
| 568 | 2201,915 | -15425,7 | 11321,12 | 71655,65 | -189,251 |
| 570 | 2348,036 | -15423,9 | 11331,98 | 76315,22 | -185,624 |
| 572 | 2490,531 | -15414,2 | 11221,17 | 80881,81 | -181,771 |
| 574 | 2628,783 | -15395,2 | 11240,49 | 85349,86 | -177,696 |
| 576 | 2762,123 | -15365,7 | 11253,67 | 89713,92 | -173,405 |
| 578 | 2889,844 | -15324,2 | 11259,55 | 93968,68 | -168,902 |
| 580 | 3011,198 | -15269,3 | 11245,11 | 98108,95 | -164,194 |
| 582 | 3125,405 | -15199,8 | 11244,67 | 102129,7 | -159,286 |
| 584 | 3231,663 | -15114,1 | 11215,56 | 106026 | -154,184 |
| 586 | 3329,149 | -15010,9 | 11186,21 | 109793,1 | -148,893 |
| 588 | 3417,034 | -14888,9 | 11048,21 | 113426,5 | -143,422 |
| 590 | 3494,485 | -14746,9 | 10984,93 | 116921,7 | -137,775 |
| 592 | 3560,681 | -14583,5 | 10905,95 | 120274,4 | -131,961 |
| 594 | 3614,818 | -14397,5 | 10804,12 | 123480,6 | -125,986 |
| 596 | 3656,12 | -14187,9 | 10690,3 | 126536,4 | -119,858 |
| 598 | 3683,851 | -13953,5 | 10563,46 | 129438 | -113,583 |
| 600 | 3697,324 | -13693,4 | 10410,57 | 132181,8 | -107,17 |

| | | | | | |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 602 | 3695,909 | -13406,4 | 10230,66 | 134764,7 | -100,627 |
| 604 | 3679,046 | -13091,9 | 9968,533 | 137183,3 | -93,9606 |
| 606 | 3646,254 | -12749 | 9423,774 | 139434,8 | -87,1801 |
| 608 | 3597,136 | -12377 | 9066,587 | 141516,5 | -80,2933 |
| 610 | 3531,396 | -11975,3 | 8667,04 | 143425,7 | -73,3087 |
| 612 | 3448,837 | -11543,4 | 8139,732 | 145160,2 | -66,2348 |
| 614 | 3349,375 | -11080,8 | 7823,857 | 146717,8 | -59,0802 |
| 616 | 3233,044 | -10587,2 | 7482,953 | 148096,7 | -51,8536 |
| 618 | 3099,996 | -10062,4 | 7116,877 | 149295,1 | -44,5639 |
| 620 | 2950,514 | -9506,23 | 6725,608 | 150311,6 | -37,2198 |
| 622 | 2785,007 | -8918,73 | 6309,257 | 151145 | -29,8304 |
| 624 | 2604,014 | -8299,96 | 5868,065 | 151794,3 | -22,4047 |
| 626 | 2408,209 | -7650,14 | 5402,405 | 152258,6 | -14,9516 |
| 628 | 2198,393 | -6969,59 | 4906,689 | 152537,5 | -7,48037 |
| 630 | 1975,496 | -6258,74 | 4387,645 | 152630,4 | -9,2E-14 |
| 632 | 1740,573 | -5518,16 | 3864,315 | 152537,5 | 7,480368 |
| 634 | 1494,801 | -4748,52 | 3307,132 | 152258,6 | 14,95162 |
| 636 | 1239,467 | -3950,64 | 2747,56 | 151794,3 | 22,40466 |
| 638 | 975,9688 | -3125,45 | 2131,936 | 151145 | 29,8304 |
| 640 | 705,7988 | -2274,01 | 1522,382 | 150311,6 | 37,2198 |
| 642 | 430,5396 | -1397,5 | 737,8529 | 149295,1 | 44,56385 |
| 644 | 151,8508 | -497,263 | 83,8459 | 148096,7 | 51,85361 |
| 646 | -128,542 | 425,2583 | -608,351 | 146717,8 | 59,08019 |
| 648 | -408,862 | 1368,475 | -1324,92 | 145160,2 | 66,23479 |
| 650 | -687,289 | 2330,668 | -2009,62 | 143425,7 | 73,3087 |
| 652 | -961,982 | 3309,99 | -2691,06 | 141516,5 | 80,29329 |
| 654 | -1231,09 | 4304,463 | -3409,79 | 139434,8 | 87,18005 |
| 656 | -1492,75 | 5311,985 | -4109,52 | 137183,3 | 93,9606 |
| 658 | -1745,15 | 6330,329 | -4848,71 | 134764,7 | 100,6267 |
| 660 | -1986,49 | 7357,152 | -5559,1 | 132181,8 | 107,1701 |
| 662 | -2215,03 | 8389,998 | -6274,94 | 129438 | 113,5831 |
| 664 | -2429,09 | 9426,304 | -6982,26 | 126536,4 | 119,8576 |
| 666 | -2627,07 | 10463,41 | -7679,14 | 123480,6 | 125,9861 |
| 668 | -2807,48 | 11498,56 | -8387,61 | 120274,4 | 131,9611 |
| 670 | -2968,92 | 12528,93 | -9051,92 | 116921,7 | 137,7753 |
| 672 | -3110,12 | 13551,62 | -9729,97 | 113426,5 | 143,4217 |
| 674 | -3229,96 | 14563,65 | -10390 | 109793,1 | 148,8933 |
| 676 | -3327,45 | 15562,03 | -11024,3 | 106026 | 154,1835 |
| 678 | -3401,75 | 16543,7 | -11654,9 | 102129,7 | 159,2859 |
| 680 | -3452,2 | 17505,62 | -12274,1 | 98108,95 | 164,1942 |
| 682 | -3478,31 | 18444,71 | -12886,1 | 93968,68 | 168,9025 |
| 684 | -3479,76 | 19357,93 | -13453,7 | 89713,92 | 173,4049 |
| 686 | -3456,43 | 20242,23 | -14011 | 85349,86 | 177,6962 |
| 688 | -3408,35 | 21094,64 | -14515,2 | 80881,81 | 181,7709 |

| | | | | | |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 690 | -3335,78 | 21912,22 | -14994,4 | 76315,22 | 185,6241 |
| 692 | -3239,15 | 22692,12 | -15441,3 | 71655,65 | 189,2512 |
| 694 | -3119,06 | 23431,59 | -15895,9 | 66908,78 | 192,6478 |
| 696 | -2976,32 | 24127,96 | -16298,1 | 62080,39 | 195,8096 |
| 698 | -2811,89 | 24778,71 | -16693,9 | 57176,37 | 198,7329 |
| 700 | -2626,93 | 25381,44 | -17058,6 | 52202,68 | 201,414 |
| 702 | -2422,72 | 25933,92 | -17362,3 | 47165,4 | 203,8497 |
| 704 | -2200,74 | 26434,06 | -17679,9 | 42070,65 | 206,0371 |
| 706 | -1962,57 | 26880 | -17929 | 36924,64 | 207,9735 |
| 708 | -1709,95 | 27270,01 | -18114,9 | 31733,65 | 209,6564 |
| 710 | -1444,71 | 27602,61 | -18312,6 | 26504 | 211,084 |
| 712 | -1168,8 | 27876,52 | -18451,7 | 21242,05 | 212,2543 |
| 714 | -884,257 | 28090,68 | -18572,7 | 15954,23 | 213,1661 |
| 716 | -593,167 | 28244,24 | -18651,8 | 10646,96 | 213,8182 |
| 718 | -297,686 | 28336,62 | -18683,1 | 5326,725 | 214,2097 |
| 720 | 0,0 | 28367,46 | -18625,8 | 0,0 | 214,3403 |